



**MODELAÇÃO PARA O MAPEAMENTO DA FAVORABILIDADE
DE COBRE E ZINCO EM MONTEPUEZ - Norte de Moçambique**

Félix Fenias Alfeu Faiela

Dissertação apresentada como requisito parcial para
obtenção do grau de Mestre em Ciência e Sistemas
de Informação Geográfica

**MODELAÇÃO PARA O MAPEAMENTO DA FAVORABILIDADE
DE COBRE E ZINCO EM MONTEPUEZ - Norte de Moçambique**

Dissertação orientada por

Professor Doutor Pedro da Costa Brito Cabral

Novembro de 2019

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE

Declaro que o trabalho contido neste documento é da minha autoria e não de outra pessoa. Toda a assistência recebida de outras pessoas esta devidamente assinalada e é efectuada referencia a todas as fontes utilizadas (publicadas ou não).

O trabalho não foi anteriormente submetido ou avaliado na NOVA Information Management School ou em qualquer outra instituição.

Lisboa, Novembro de 2019

Felix Fenias Alfeu Faiela

[A versão assinada pelo autor encontra-se arquivada nos serviços da NOVA IMS]

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus Pai Todo Poderoso. Sem ele jamais teria conseguido chegar até aqui. Há muito ainda em percorrer, mas tenho fé que me fortalecerá com mais saúde, paz e sabedoria. Muito Obrigado Senhor.

Ao Professor Doutor Pedro da Costa Brito Cabral pela orientação do trabalho e por ter acreditado no desenvolvimento do mesmo.

Agradeço ao Professor Doutor Marco Painho, pelas observações e sugestões no melhoramento do trabalho durante as sessões síncronas de TPE.

A minha esposa Lúcia e a meus filhos: Hélio, Elaine e Elien, pela paciência compreensão nos momentos de ausência para estudos.

Ao meu pai Alfeu Faiela (em memória) e a minha Mãe Lúcia Estevão; aos meus irmãos pela força que me deram para abraçar o desafio da formação.

Enfim, a todos que directa e indirectamente contribuíram para a minha formação e no desenvolvimento deste estudo.

Muito obrigado

Félix Faiela

Modelação para o Mapeamento da Favorabilidade de Cu e Zn em Montepuez - Norte de Moçambique

RESUMO

Este trabalho desenvolve um modelo em SIG para identificação de áreas com potencialidade de Cu e Zn através do método de modelação multicritério. O estudo combinou os resultados de levantamento geofísico aéreo, geoquímico, estrutural, litológico e de alteração hidrotermal extraídos a partir de processamento de imagens satélite. O processo de integração de dados envolveu a ponderação e a classificação dos factores acima mencionados que influenciam a favorabilidade de Cu e Zn. Foram geradas zonas de influência para estruturas lineares e alterações hidrotermais. A geração dos mapas de predição precedeu a construção do mapa final de favorabilidade. Como resultado do processo de modelação, uma área de 0.55 km² foi identificada como potencial para ocorrência de cobre e zinco, e a mesma recomenda-se para trabalhos de prospecção e pesquisa de monitorização. O estudo foi desenvolvido num ambiente *greenfield* sem depósitos conhecidos tendo sido aplicada uma abordagem orientada pelo conhecimento pericial na atribuição de pesos dos factores analisados.

PALAVRAS-CHAVE

Sistemas de Informação Geográfica (SIG), Favorabilidade, Modelação Multicritério, Ponderação.

Modelling for Cu and Zn Favorability Mapping in Montepuez - Northern Mozambique

ABSTRACT

This work develops a model to identify copper and zinc potential areas using multicriteria modelling method in GIS environment. The study combined results of aerial, geochemical, structural, lithological and hydrothermal alteration extracted from processing of satellite image. The process of data integration involves weighting and classification of factors above mentioned that influences the favorability of Cu and Zn. Buffer zones were generated from linear structures and hydrothermal alteration data. The conception of prediction maps preceded the conception of final favorability map. As result of the modeling, an area of about 0.55 km² was identified as potential for copper and zinc occurrence and is recommended for a follow-up exploration work. The study was carried out in a greenfield environment with no deposits known, and an expert knowledge driven approach for weighting the analyzed factors.

KEYWORDS

Geographic Information Systems (GIS), Favorability, Multicriteria Modeling, Weighting.

ACRÓNIMOS

A	Alto
ASTER	<i>Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer</i>
AUN	Agência Universitária de Notícias
Avg	<i>Average</i>
B	Baixo
CLP	Combinação Linear Ponderada
Cu	Cobre
WGS	<i>World Geodetic System</i>
EAR	Entidade – atributo – relação
ENE	Este Noroeste
ENVI	<i>Environment for Visualizing Images</i>
EOS	<i>Earth Observing System</i>
FLAASH	<i>Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes</i>
FPCS	<i>Feature-Oriented Principal Component Selection</i>
FTG	<i>Full tensor gradiometry</i>
GDB	Geodatabase
IARR	<i>Internal Average Relative Reflection</i>
Km	Quilometro
M	Moderado
Mag	Magnético
Mn	Manganês
MNF	<i>Minimum Noise Fraction</i>
MPO	Média Ponderada Ordenada
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
NE	Nordeste
NW	Noroeste
Pb	Chumbo
PPI	<i>Pixel Purity Index</i>
Ppm	Partes por milhão
Prof	profundidade
S1	Deformação da fase 1
S2	Deformação da fase 2
S2	Deformação da fase 3
SAM	Spectral Angle Mapping
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
DR	Detecção Remota
SW	Sudoeste
SWIR	<i>Short Wave Infrared</i>
TIR	<i>Thermal Infrared</i>
Tzz	Vertical tensor component
UNL	Universidade Nova de Lisboa
USP	Universidade de São Paulo
VNIR	Visible and Near Infra-Red
VMS	<i>Vulcanogenic Massive sulphides</i>
VTEM	Versatile time domain electro-magnetics
WNW	Oeste Noroeste
XRF	Fluorescência de Raio X
Zn	Zinco

ÍNDICE GERAL

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
RESUMO	iii
PALAVRAS-CHAVE	iii
ABSTRACT	iv
KEYWORDS	iv
ACRÓNIMOS	v
ÍNDICE GERAL.....	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	ix
ÍNDICE DE TABELAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do Trabalho.....	2
1.2. Relevância.....	3
1.3. Objectivos	4
1.4. Organização do Trabalho.....	5
2. ÁREA DE ESTUDO.....	6
2.1. Enquadramento geológico	7
2.1.1. Geologia Regional	7
2.1.2. Descrição de Principais Litologias Regionais	11
2.1.3. Geologia Local	15
2.1.4. Geologia Estrutural.....	16
2.1.5. Mineralizações.....	17
2.1.6. Tipo de Depósito	18
3. REVISÃO DA LITERATURA	19
3.1. Conceito de Principais Termos Usados no Trabalho	19
3.2. Métodos de Prospekção e Pesquisa de Depósitos Minerais.....	21
3.3. Detecção Remota no Mapeamento de Alteração Hidrotermal.....	22

3.4.	SIG e Prospeccção e Pesquisa de Depósitos Minerais	23
3.5.	SIG no Mapeamento de Favorabilidade Mineral: Alguns Exemplos.....	25
3.6.	Processo de Integração de Dados Espaciais em SIG	27
3.7.	Modelação de Integração	28
3.7.1.	Modelos Descritivos e Preditivos	28
3.8.	Análise Multicritério em SIG.....	29
3.8.1.	Sobreposição Ponderada (Weighted Overlay)	29
3.8.2.	Etapas de Análise de Sobreposição	30
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	31
	Fase I: Pesquisa Bibliográfica e Geração da Base de Dados.....	32
	Fase II: Geração do Modelo de Favorabilidade	32
	Fase III: Modelo Final, Teste e Redacção do Relatório	32
4.1.	Dados	34
4.1.1.	Litologia.....	34
4.1.2.	Estruturas Lineares	35
4.1.3.	Geoquímica de Solos	37
4.1.3.1.	Dados de Análises Químicas de Cu	37
4.1.3.2.	Dados de Análises Químicas de Zn	39
4.1.4.	Dados de levantamento Geofísico	41
4.1.4.1.	Gravimetria - FTG Tzz.....	41
4.1.4.2.	Magnetometria - RTP.....	42
4.1.4.3.	Eletromagnetometria - VTEM.....	43
4.1.5.	Dados de Imagens Satélite – ASTER L1T.....	44
4.1.5.2.	Pré-processamento	44
4.1.5.2.	Processamento de Dados	45
4.1.5.3.	Absorção espectral de minerais de alteração.....	46
4.1.5.4.	Mapeamento de zonas de alteração	46
4.2.	Construção da Geodatabase	47
4.2.1.	Identificação de Entidades	47
4.2.2.	Identificação dos Atributos das Entidades	47
4.2.3.	Etapas da Construção da Geodatabase.....	48
4.2.4.	Modelo Lógico da Geodatabase	48

4.2.5. Modelo Físico da Geodatabase	49
4.2.6. Teste da Geodatabase.....	50
4.3. Operações de Modelação de Favorabilidade de Cu e Zn.....	51
4.3.2. Pontuação dos Atributos das Variáveis	53
4.3.3. Reclassificação dos Atributos	53
4.3.4. Fluxograma de Modelação da Favorabilidade de Cu e Zn	55
4.3.5. Produção do Mapa Final de Favorabilidade e Teste do Modelo	57
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	59
5.1. Extracção de Zonas de Alteração Hidrotermais.....	59
5.1.1. Alteração Propílica	59
5.1.2. Alteração Argílica.....	61
5.1.3. Óxidos de Ferro	63
5.2. Resultados da Reclassificação.....	65
5.3. Mapa Final de Favorabilidade.....	67
5.4. Teste do Modelo de Favorabilidade	69
5.5. Validação do Modelo.....	72
5.6. Limitações do Estudo	72
6. CONCLUSÕES	73
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	76
ANEXOS	84

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS DE IMAGENS ASTER.....	85
ANEXO B: QUESTIONÁRIO ENVIADO A GEOLOGOS ESPECIALISTAS	88
ANEXO C: DISTANCIA DE INFLUÊNCIA E RESPECTIVA PONTUAÇÃO PARA ALTERAÇÃO HIDROTHERMAL E ESTRUTURAS LINEARES	92
ANEXO D: PONTUAÇÃO GERAL DAS VARIÁVEIS E ATRIBUTOS	93
ANEXO E: MAPAS DE FAVORABILIDADE COM VARIAÇÃO DA PONDERAÇÃO DE VARIÁVEIS PARA TESTE DA SENSIBILIDADE (1%, 28% E 64%).	94

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 Principais tipos de dados aplicados no estudo.	34
Tabela 2 Reclassificação dos intervalos de pontuação dos principais atributos	53
Tabela 3 Critérios de favorabilidade e respectivos pesos de influência de Cu e Zn. Atributos das variáveis com a pontuação relativa e sua reclassificação em níveis de favorabilidades.....	54
Tabela 4 Ponderação atribuída aos modelos de teste para a análise de sensibilidade (adaptado de Al-Mashreki <i>et al.</i> , 2011).	58
Tabela 5 (Continuação) Ponderação atribuída aos modelos de teste para a análise de sensibilidade (adaptado de Al-Mashreki <i>et al.</i> , 2011).	58
Tabela 6 Resultado da Ponderação atribuída as variáveis em forma de área total dos níveis de favorabilidade em Km ²	70
Tabela 7 Resultado da Ponderação atribuída as variáveis em percentagens relativas as áreas dos níveis de favorabilidade.	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Localização da área de estudo (Fonte: CENACARTA, 1999).....	6
Figura 2. Mapa com principais unidades geológicas da região Norte de Moçambique (Boyd <i>et al.</i> , 2010).....	8
Figura 3. Mapa Geológico do distrito de Montepuez com Principais Unidades Litologias (adaptado de Boyd <i>et al.</i> , 2010).....	10
Figura 4. Mapa Geológico Local com Principais Lineamentos	16
Figura 5. Aspectos tecnológicos de SIG segundo Antenucci <i>et al.</i> , (1991).....	20
Figura 6. Integração de dados espaciais como um processo de três etapas.	27
Figura 7. Fluxograma com indicação de principais etapas aplicadas na elaboração do trabalho.....	33
Figura 8. Mapa geológico local com principais litologias no modelo matricial.	35
Figura 9. Dados de estruturas lineares da área de estudo. a) geologia com unidades litológicas em sobreposição com estruturas lineares. b) Estruturas lineares com respectivas áreas de influência a 150, 300 e 450m.	36
Figura 10. Dados de amostragem geoquímica de solos para o Cu. a) Resultados de analíticos de Cu em diagramas circulares. b) Interpolação por krigagem dos resultados analíticos de Cu.....	38
Figura 11. Dados de amostragem geoquímica de solos para o Zn. a) Resultados de analíticos de Zn em diagramas circulares. b) Interpolação por krigagem dos resultados analíticos de Zn.....	40
Figura 12. Imagem de levantamento gravimétrico aéreo <i>FTG Tzz</i> da área de estudo	41
Figura 13. Imagem de levantamento magnético aéreo RTP da área de estudo.....	42
Figura 14. Imagem de levantamento electromagnético aéreo <i>VTEM</i> da área de estudo	43

Figura 15. Imagem ASTER -L1T, processada com zonas de alteração definidas pelas relações de bandas 2/1 para óxidos de ferro, 4/ (5+6) para a alteração argílica e (6+9) / (7+8) para a alteração propilítica.....	46
Figura 16. Modelo de base dados de prospecção e pesquisa mineira de Montepuez	49
Figura 17. Estrutura da geodatabase ‘Montepuez_GDB.’ em ArcCatalog após a importação do ficheiro XML.....	50
Figura 18. Fluxograma do modelo aplicado na determinação de áreas favoráveis a ocorrência de Cu e Zn.	56
Figura 19. Imagem ASTER -L1T, processada e com zonas de alteração hidrotermal definidas pelas relações de bandas (6+9) / (7+8) para a alteração propilítica.....	60
Figura 20. Áreas de influência definidas para alteração propilítica a distância de 100, 200 e 300m	60
Figura 21. Imagem ASTER -L1T, processada e com zonas de alteração hidrotermal definidas pelas relações de bandas 4/ (5+6) para a alteração argílica.....	62
Figura 22. Áreas de influência definidas para alteração argílica a distância de 100, 200 e 300m.....	62
Figura 23. Imagem ASTER -L1T, processada e com zonas de alteração hidrotermal definidas pelas relações de bandas 2/1 para óxidos de ferro.....	64
Figura 24. Áreas de influência definidas por óxidos de ferro a distância de 100, 200 e 300m.....	64
Figura 25. Reclassificação dos atributos das variáveis analisadas no modelo de favorabilidade para a área de estudo. a) Litologias, b) Geoquímica de Zn, c) Geoquímica de Cu, d) Estruturas lineares, e) Mag_RPT, f) VTEM, g) FTG_Tzz, h) Alteração argílica, i) Alteração propilítica e j) Óxidos de ferro.....	66
Figura 26. Mapa final com áreas favoráveis a ocorrência de mineralizações de Cu e Zn.	68

Figura 27. Gráficos de análise de sensibilidade das variáveis do modelo, com ponderação de 1%, 28% e 64% (baseados nas tabelas 4, 5, 6 e 7). a) Geoquímica Cu; b) VTEM; c) Litologia; d) Geoquímica Zn; e) Alteração propílica; f) Óxidos de ferro; g) Alteração argílica; h) Estruturas lineares; i) MAG e j) FTG..... 71

1. INTRODUÇÃO

As actividades de prospecção e pesquisa mineira são caracterizadas por agregarem diversos dados de natureza espacial como, por exemplo, dados geológicos, dados multiespectrais de satélite, dados geofísicos, dados geoquímicos e outros com formato diversificado cuja combinação dá origem a várias hipóteses para delinear programas de monitorização. A melhor plataforma para combinação destes dados e obter um resultado satisfatório é a partir de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) (Osman, 2012). Os SIG têm a habilidade de agrupar e combinar diferentes unidades litológicas, estruturais, dados de levantamento geofísico e geoquímico para delimitar alvos de favorabilidade mineral (Bonham-Carter, 1994).

A aplicação de critérios de prospecção e pesquisa mineira, fornecidos pelos modelos conceptuais de depósitos minerais, são bases importantes para a geração de informação de favorabilidade de ocorrência mineral (Osman, 2012)

Há vários estudos feitos para mapeamento de favorabilidade mineral a partir de SIG. Dentre esses estudos, diversas técnicas de modelação espacial são desenvolvidas e testadas por pesquisadores. São duas abordagens de modelação que podem ser encontradas: abordagem orientada pelo conhecimento, é subjectiva, confia na opinião do modelador ou especialista para fornecer a ponderação relativa. A abordagem baseada em dados, é mais objectiva, usa a estatística na determinação de parâmetros do modelo IAEA (1994).

Em Moçambique, não existe nenhum trabalho publicado sobre mapeamento de favorabilidade mineral de Cu e Zn aplicando SIG. Este estudo utilizou a abordagem orientada pelo conhecimento e dez factores que consistem em litologia, lineamentos, magnetometria RTP, gravimetria FTG_tzz, VTEM, geoquímica de Cu e Zn, alteração propílica, alteração argílica e óxidos de ferro foram analisados.

Foi definida uma metodologia em que os SIG são aplicados para integração e análise de dados com objectivo de identificar a relação espacial e aplicar modelos multicritérios baseados na sobreposição ponderada para encontrar a melhor abordagem de predição para mapeamento de favorabilidade de Cu e Zn em Montepuez, Moçambique

1.1.Enquadramento do Trabalho

As actividades de prospecção e pesquisa mineira tem evoluído bastante nos últimos anos, há introdução de novas técnicas de pesquisa por causa do desenvolvimento de novas tecnologias e que as mesmas exigem a aplicação de ferramentas de SIG para o seu uso adequado. O tipo de informação recolhida na prospecção e pesquisa é totalmente espacial e pode ser mapas geológicos, sondagens, estruturas, escavações de trincheiras e poços, amostragem geoquímica de solos ou testemunho de sondagem, amostragem de rochas, geofísica terrestre e aérea, descrição de unidades geológicas, etc. Como se pode observar, há muita quantidade de informação espacial que pode ser aplicada facilmente através de técnicas de modelação para prever ocorrências de minerais.

É neste âmbito que este trabalho foi desenvolvido com o propósito de criar um modelo de favorabilidade de ocorrência de Cu e Zn numa região localizada a Sul do distrito de Montepuez, Norte de Moçambique. O desenho do modelo deve reflectir a abertura e uso para casos semelhantes e ser compartilhado pelos usuários para o mesmo tipo de projecto. A modelação da informação espacial é importante, pois, é uma técnica usada para a especificação de regras e estrutura de dados existentes.

O trabalho se enquadra no curso de mestrado em *Ciência e Sistemas de Informação Geográfica*, oferecido pela Universidade Nova de Lisboa e é feito no contexto de uma empresa de prospecção e pesquisa mineira (*Rovuma Resources*) que exerce as suas actividades em Montepuez.

1.2.Relevância

Os SIG contribuem significativamente para o sucesso de investigações geológico mineiros envolvendo variáveis espaciais. Contudo há necessidade duma discussão sobre melhores métodos e técnicas a serem usados em modelação mineira, a fim de evitar resultados discrepantes da realidade. Estas técnicas e métodos devem ser criteriosos sem se tornarem complexos a ponto de impossibilitar sua utilização (Lobão *et al.*, 2011).

A área de estudo, que faz parte da terminação Sul do cinturão de Moçambique no território moçambicano, é dominado por rochas que hospedam diferentes tipos de mineralizações a partir de metais básicos e preciosos, minerais industriais, pedras preciosas, etc. Apesar dos esforços que têm sido feitos pelas entidades estatais e privadas locais, através de programas de prospecção e pesquisa mineira intensivas, a quantidade de informação existente sobre a disposição de mineralizações e sua associação com rochas hospedeiras continua escassa.

O mapeamento de favorabilidade de ocorrência de Cu & Zn, desenvolvido neste trabalho, é muito importante para gestores de programas de exploração geológico e mineiro, uma vez que influencia no melhor direccionamento de actividades. Outras vantagens incluem:

- Selecção de alvos de confiança;
- Minimização do tempo e custos na pesquisa geológico mineiro no terreno.
- Produção de Mapas de ocorrência mineral fiáveis;
- Acréscimo na disponibilidade de dados de natureza espacial para a pesquisa mineira.

1.3.Objectivos

O objectivo principal do trabalho é a modelação em ambiente SIG de dados litológicos, estruturais, geofísicos, geoquímicos e de alteração hidrotermal para mapeamento de áreas favoráveis a ocorrência de cobre e zinco em Montepuez, no Norte de Moçambique.

Foram delineados os seguintes objectivos específicos:

- Uma vez que a informação relativa a disposição de mineralizações de Cu-Zn na região de Montepuez é muito pobre, o trabalho contribuirá no aumento do conhecimento da potencialidade de ocorrência e distribuição destes metais.
- Pretende-se igualmente contribuir na tomada de decisão para trabalhos de seguimento na área de estudo reduzindo a malha de prospecção e pesquisa e consequentemente baixando os custos.

1.4. Organização do Trabalho

Este trabalho encontra-se organizado em cinco (6) capítulos.

O capítulo 1, faz a introdução do trabalho, dando uma observação a cerca da sua importância na prospecção e pesquisa mineira. Ainda no mesmo capítulo, é feito um breve enquadramento no contexto de SIG e criação do modelo de favorabilidade. São estabelecidos os objectivos do estudo, a relevância do trabalho.

No capítulo 2, é feita a descrição da área de estudo incluindo a localização geográfica, a descrição geológica regional, local e respectiva análise estrutural. Para complementar a análise geológica local, é feita a descrição de mineralizações e do tipo de depósito.

O capítulo 3, trás a revisão da literatura incluindo a definição de principais termos usados no trabalho. São ainda dados os conceitos de principais métodos de pesquisa mineral, dos SIG na prospecção e pesquisa, dos modelos descritivos e preditivos de integração, de alterações hidrotermais a partir de imagens satélite e a aplicação de SIG no mapeamento de favorabilidade mineral com exemplos de trabalhos feitos.

O capítulo 4, descreve a metodologia proposta para alcançar os objectivos definidos, faz a descrição de dados usados no estudo e a construção do modelo geodatabase. Discute os procedimentos de integração de dados com base na metodologia aplicada. O fluxograma da modelação de base de dados, o modelo físico e o respectivo teste, e feito neste capítulo. O fluxograma do modelo de favorabilidade de Cu e Zn para a área de estudo, desenhado a partir da ferramenta *Model Builder*, é detalhado neste capítulo.

O capítulo 5, apresenta os resultados obtidos e a discussão dos mesmos. O teste do modelo de favorabilidade variando a ponderação das variáveis que influenciam o modelo e a descrição das limitações verificadas no trabalho são feitos neste capítulo.

E por fim o capítulo 6, discute as principais conclusões obtidas no trabalho.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo localiza-se a Sul do distrito de Montepuez na província de Cabo Delgado, Norte de Moçambique a cerca de 220 km da Capital Provincial – Pemba (Figura 1). Ocupa uma extensão aproximada de 47,3 km².

A escolha desta área deveu-se a inexistência de um estudo similar em Montepuez, assim como a disponibilidade de dados de levantamento geológico, geoquímico, geofísico e de imagens satélite para o local de estudo. Constitui o início da modelação de dados informação geológica para o mapeamento de favorabilidade de Cu e Zn em Montepuez.

A área de estudo, faz parte da licença de prospecção e pesquisa da *Rovuma Resources*, onde vem desenvolvendo seus trabalhos. A prospecção e pesquisa até à data foi realizada através de seguimento de alvos geoquímicos, geológicos e geofísicos (magnéticos, gravimétricos e VTEM). As mineralizações encontradas, sugerem um modelo de depósito do tipo VMS (Evans, 2014). Há predominância de veios de sulfuretos acompanhadas por níveis variados de alteração hidrotermal nas rochas hospedeiras.

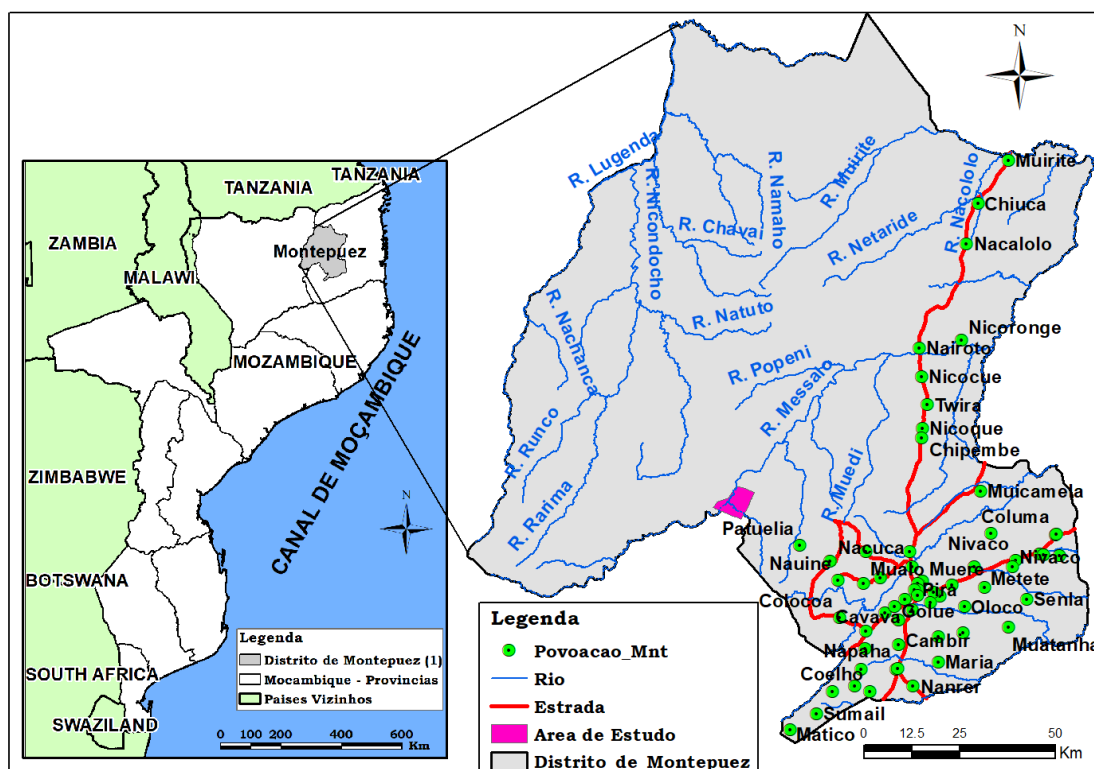


Figura 1. Mapa de Localização da área de estudo (Fonte: CENACARTA, 1999)

2.1. Enquadramento geológico

2.1.1. Geologia Regional

Segundo Holmes (1951), o soco cristalino Precâmbrico do Norte de Moçambique constitui a terminação sul do Cinturão Neoproterozóico de Moçambique. Este cinturão tem sido interpretado como o local da colisão do Gondwana Este e Oeste (Kröner *et al.*, 1997), constituindo assim sutura fundamental na associação do Supercontinente Gondwana.

A Norconsult (2007), fez um mapeamento geológico na região Norte de Moçambique, tendo dado uma enorme revisão da geologia proposta por (Pinna *et al.*, 1993). Boyd *et al.*, (2010), dividiram o Norte de Moçambique em unidades tectono-estratigráficas a baixo:

➤ Complexo Paleoproterozóico de Ponta Messuli, no extremo Noroeste de Moçambique, na margem do Lago Niassa, é considerado como parte do sistema *Ubendian - Usagaran* da Orógenia Este Africana, que é mais representado no território tanzaniano.

➤ Complexos Mesoproterozóicos de Unango, Marrupa, Nairoto e Meluco, representam a crosta calco-alcalina juvenil que evoluiu entre 1,06 e 0,95 Ga. Esta crosta possivelmente tenha se formado em arco continental e assentada na margem sudeste do Cratão Congo-Tanzânia durante a orogenia Irumide.

➤ Complexos Neoproterozóicos de Xixano, Muaquia, M'Sawize, Lalamo e Montepuez, são juvenis e cobrem a crosta mesoproterozóica, funcionando soco cristalino. As rochas máficas a intermédias cálcicas, com níveis baixos de K e magmáticas, nesses complexos são características de arco vulcânico primitivo e sugerem um desenvolvimento como arcos vulcânicos do continente Mesoproterozóico. Não está claro se os quatro complexos Mesoproterozóicos foram justapostos antes e actuaram como única entidade crustal. Os três níveis tectono-estratigráficos foram justapostos em sua posição relativa num evento orogénico compressional, cujo pico foi a 550 Ma.

Segundo a divisão tectono-estratigráfica de Boyd *et al.*, (2010), a área de estudo enquadra-se no complexo de Xixano que é um dos vários complexos supercrustais Neoproterozóicos incluindo os complexos Muaquia, M'Sawize, Lalamo e Montepuez, sobrepondo-se ao soco cristalino Mesoproterozóico com contactos tectónicos interpretados como *nappes* (Figura 2). As numerosas unidades cálcicas máficas a intermédias e ortogneisses com níveis baixos de K no Complexo Xixano datam em cerca de 740 Ma (Bingen *et al.*, 2009), e são caracterizadas por uma assinatura radiométrica fraca em levantamentos geofísicos aéreos (Viola *et al.*, 2008) característicos de arcos vulcânicos primitivos. As rochas máficas a intermédias exibem assembleias de fácies granulíticas e são interpretadas como a parte inferior de um arco vulcânico, oceânico ou pericontinental por Boyd *et al.*, (2010). Segundo observações de campo de Pohl (2011), trata-se de uma crosta oceânica e rochas de arco primitivas que se desenvolveram a um arco mais evoluído com sistemas de depósito clástico adjacentes na parte sul do complexo Xixano. Pacotes de rochas similares à porção máfica das rochas do Complexo Xixano aparecem ao Norte na Tanzânia e hospedam mineralizações de níquel-cobre recentemente descobertos.

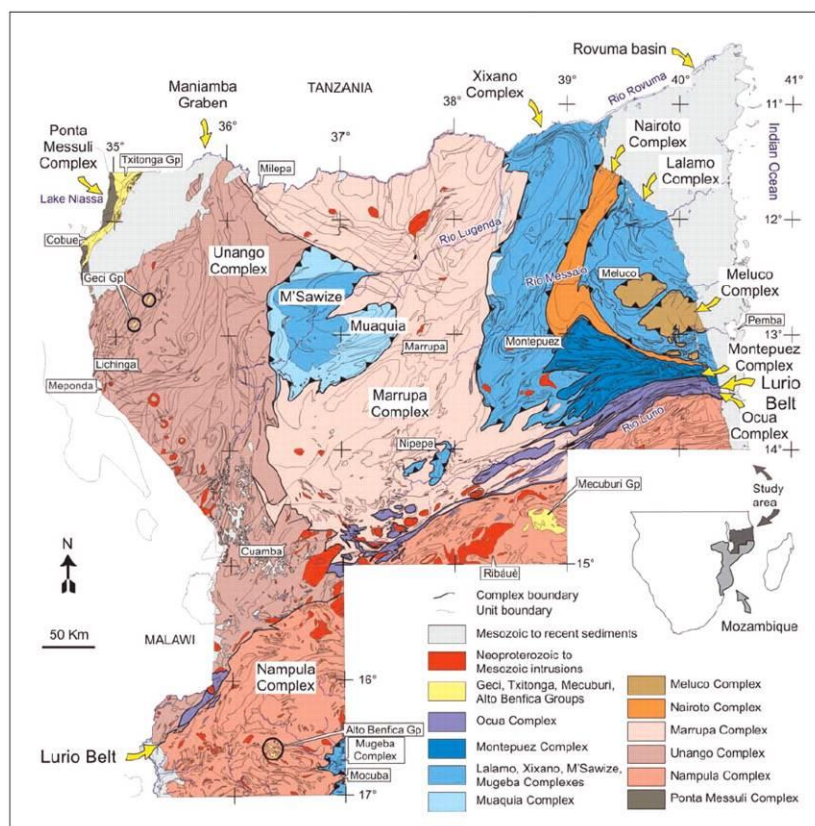


Figura 2. Mapa com principais unidades geológicas da região Norte de Moçambique (Boyd *et al.*, 2010).

Complexo de Nairoto

Ao longo da estrada principal Montepuez - Nairoto encontra-se uma secção espessa com cerca de 10-15 km de extensão, de fácies anfibolíticas, gnaisses feldspato-quartzo-biotite-granada, com níveis variados de migmatização e intrusões pegmatíticas (Pohl, 2011). No entanto, Boyd *et al.*, (2010), Pinna *et al.*, (1993) identificam essas rochas como ortognaisses, embora permita uma componente de meta-arkose. Segundo Pohl, (2011), a presença da granada nos gnaisses félsicos torna essas rochas incompatíveis com os granitos do tipo I, como postulado por Boyd *et al.*, (2010).

Jamal, (2005) e Bingen *et al.*, (2006) estabelecem uma idade para o Complexo de Nairoto como equivalente ao Complexo de Maruppa, em 1.1 a 1.05Ga. Bingen *et al.*, (2006), referem-se a intrusões graníticas em um pacote arcóico sedimentar para o Complexo Maruppa. Portanto, porque o complexo de Nairoto parece litologicamente semelhante e ocupa uma posição tectônica similar ao Complexo Maruppa, por analogia é da mesma idade.

Complexo Xixano

O Complexo Xixano apresenta uma tendência norte-nordeste com cerca de 50 km de largura. A Norte, consiste predominantemente de granulitos máficos, intrudidos por peridotito-piroxenito-gabro diferenciado e unidades carbonáticas locais (Figura 3). Nas porções Sul e Sudoeste do complexo de Xixano as rochas tornam-se muito mais heterogêneas, com componentes significativas de rochas sedimentares evoluídas, ou seja, quartzitos, sedimentos clásticos, exalativos (gondites, quartzitos com gahnite-spessatine) bem como rochas metavulcânicas. O componente vulcânico destas rochas, que agora são difíceis de diferenciar dos sedimentos vulcanoclásticos proximais devido à recristalização das fácies granulíticas, parecem ser de natureza bimodal (Pohl, 2011).

Assim, a porção norte do Complexo Xixano parece ser uma crosta oceânica com arcos magmáticos juvenis.

A atividade magmática nos Complexos de Xixano, Lalamo e Montepuez é considerada entre 820 e 700 Ma e Boyd *et al.*, (2010), os interpreta como parte de um arco ou conjunto de arcos desenvolvidos "fora-de-margem" do continente Mesoproterozóico

(Viola *et al.*, 2008). Neste contexto, as seqüências metassedimentares que elas contêm podem ser interpretadas como tendo sido formadas em bacias fore-arc ou back-arc. (Melezhik *et al.*, 2008) dataram os mármore de Montepuez em 1,1 a 1,05 Ga, sugerindo que o complexo supercrustal de Montepuez pode ser soco cristalino continental mais antigo que 820 Ma, mas esta descoberta pode ser controversa (Bingen *et al.*, 2009). Pohl (2011), defende fortemente a supressão completa do termo Pan-Africano, uma vez que é muito tempo extenso, para ter qualquer validade. O evento tectónico de compressão, leste a oeste, no Neoproterozóico tardio em torno de 550 Ma foi responsável pelos nappes tectónicos, empilhamento crustal, soterramento profundo e metamorfismo de fácies granulíticos e a configuração actual dos vários complexos no leste de Moçambique (Viola *et al.*, 2008).

A figura 3, representa a geologia do distrito de Montepuez, onde rochas granulíticas, incluindo os charnockitos, encontram se presentes no Complexo de Xixano.

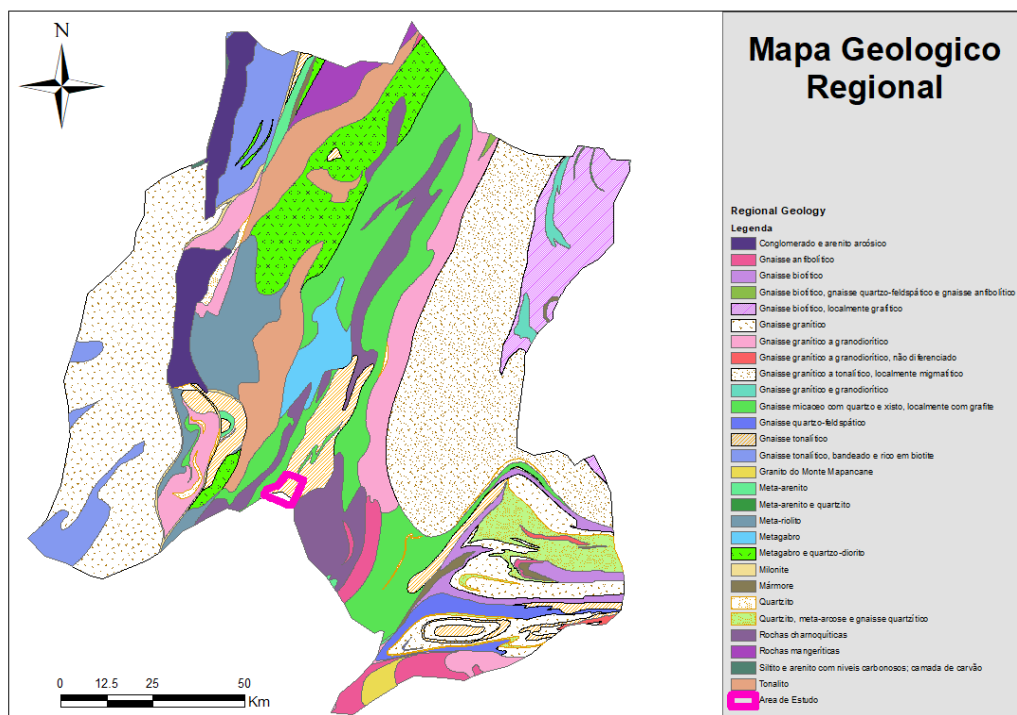


Figura 3. Mapa Geológico do distrito de Montepuez com Principais Unidades Litológicas (adaptado de Boyd *et al.*, 2010)

2.1.2. Descrição de Principais Litologias Regionais

Gnaisse quartzo-feldspático com granada

O complexo de Xixano é formado por paragnaisses de alto grau, com composição quartzo-feldspático, biotite e granada acessória, de granulação fina a média. Existem bandas finas (mm) entre as camadas máficas e mais félsicas, compostos por biotite. As rochas são migmatíticas, com leucossomas dominadas por K-feldspato, que formam veios paralelos e transversais. Localmente, as leucossomas contêm granadas até 1 cm de diâmetro. A foliação pode ser bastante ondulada e lenticular a fortemente plana em zonas de alta tensão. Os gnaisses semi-pelíticos, ricos em biotite, são intercalados com leucognaisses e migmatitos mais félsicos, com grãos finos a médios (Norconsult, 2007).

Metariólito

Rochas metavulcânicas félsicas não cobrem grandes áreas dentro do complexo de Xixano. A litologia tem uma aparência marrom claro e lustrosa e é geralmente não foliada. Possui bandas distintas entre minerais máficos e félsicos em escala de mm. No geral, a rocha tem uma composição félsica, com um tamanho de grão muito fino (0,5-1 mm). É uma rocha quartzo feldspática com alguns grãos dispersos de plagioclase, hematite e biotite em tamanho de mm. A textura vulcânica primária é vista, em seção fina, como preservada. Fenocristais de K-feldspato até 1 mm de diâmetro estão presentes (Norconsult, 2007).

Gnaisse biotítico, gnaisse quartzo-feldspático e gnaisse anfibolítico

Cinturões heterogêneas de paragnaisses ocorrem na parte oriental do complexo de Xixano. No centro, gnaisses biotíticos de grão fino, branco acinzentados e foliados, assumidos como representantes de paragnaisses são dominantes. Gnaisses biotíticos semelhantes, estão localizados a norte da aldeia de Matio. São considerados paragnaisses, sintetizados pela observação de xisto quartzo-micáceo com finas camadas entrelaçadas com quartzito. Continuam a Sul da aldeia de Matio, compreendendo quartzo, K-feldspar, biotite, plagioclase e quantidades subordinadas de hornblenda e titanite (Norconsult, 2007).

Gnaiss micáceo com quartzo e xisto, localmente com grafite

Segundo a Norconsult (2007), esta unidade é difundida no Complexo de Xixano e compreende cinturões largos que geralmente são caracterizados por sinais radiométricos elevados, especialmente para o tório. As proporções de biotite e moscovite são variáveis. A unidade é importante do ponto de vista económico, porque os gnaisses e xistos são localmente grafíticos. Eles também contêm silimanite localmente. Partes localizadas e menores de outros paragneisses, como gnaiss quartzo-feldspático, meta-arenito, quartzito e anfibolito, estão incluídas nesta unidade. Não foram mapeadas em separado devido à falta de exposições.

Meta-arenito

Forma várias lentes tectónicas isoladas ao longo de uma grande zona de cisalhamento juxtapondo o Complexo Xixano ao Complexo Marrupa. O tipo de rocha é branca maciça, de granulação fina e rico em quartzo. Contém também conteúdos variados de plagioclase, um mineral escuro não magnético não identificado de granulação fina, possivelmente titanite e, localmente, pequenas quantidades de muscovite e hematite. A rocha é frequentemente marrom clara quando mais psamítica, essa variedade é de grão fino (0,5-1,5 mm) e contém quartzo, feldspato, mica branca e biotite local, com quantidades variáveis de plagioclase (Norconsult, 2007).

Quartzito

O quartzito é um tipo de rocha comum nos metassedimentos do Complexo de Xixano, mas ocorre apenas como fragmentos tectónicos finos cobrindo áreas muito limitadas. Ocorrem como lentes dobradas no contato entre os complexos de Marrupa e Xixano. O quartzito geralmente contém mais de 75% de quartzo e localmente poderia ser chamado de quartzito feldspático. Muitas vezes é maciço em afloramentos, mas é localmente foliado. Possui uma ampla variedade de tamanhos e composições de grãos, de 0,1-0,5 mm em bandas mais bem foliadas e tamanhos de grãos de até 5-6 mm em afloramentos mais maciços. Ele contém quantidades variáveis de feldspato, parecendo se classificar em meta-arkose (Norconsult, 2007).

Mármore

O mármore é um recurso mineral importante no Complexo de Xixano, apesar de ocorrer em pouquíssimos afloramentos. Várias unidades foram mapeadas pela Norconsult (2007): Uma extensa unidade de mármore na área de Negomano, dentro de uma série de rochas meta-supracrustais. É interpretado como tendo, no total, cerca de 50 a 60 km de comprimento e até 1 km de largura. Uma lente menor ocorre a Norte desta; uma unidade de mármore menor e impuro é encontrado a sul da vila de Negomano; uma lente tectónica dobrada menor é encontrada a sul do Complexo Xixano; uma unidade menor de mármore em Mueda com 5-6 km de comprimento; o mármore principal de Montepuez, esta dentro da faixa tectónica do complexo de Montepuez. Esta zona parece estar tectonicamente "comprimida" em direcção ao sudoeste.

Gnaiss mangerítico

Uma unidade separada, mais mangerítica, é encontrada na parte norte do maciço intrusivo básico em Negomano, com numerosos afloramentos dentro e ao redor do maciço montanhoso de Bundi. Os afloramentos consistem principalmente em gnaiss granulítico de composição intermédia (mangerítica). É geralmente foliado e foi transformado em gnaiss hornblendico. Grãos de ortopiroxêna marrom estão presentes nos núcleos de alguns grãos de anfibóla. As proporções de minerais máficos e félsicos são de ~ 50: 50. Localmente, gnaisses mangeríticos contêm inclusões de gnaiss anfibolítico de grão fino, que podem ser xenólitos (Norconsult, 2007).

Gnaiss granítico a granodiorítico

Segundo a Norconsult (2007), é a componente moderadamente comum no Complexo de Xixano. É encontrado como lentes tectónicas na parte ocidental do complexo ao longo do contato com o complexo de Marrupa. Uma zona ampla também ocorre ao longo do contato leste, com o Complexo de Nairoto. São rochas de granulação fina a média (0,5-4 mm), contendo quartzo + plagioclase e quantidades variáveis de K-feldspato. A biotite é o mineral máfico dominante, mas alguma anfibóla está presente. Os minerais máficos geralmente compreendem ~ 5% da rocha, embora existam variedades leucocráticas.

Gnaiss tonalítico

Ortognaisses mais intermédios, incluindo gnaisses tonalíticos a dioríticos, estão presentes em Xixano, Negomano e Mueda. O gnaiss tonalítico presente em Mueda é migmatítico com leucossomas irregulares e frequentes de quartzo e plagioclase alternando com camadas e bandas mais escuras de biotite e hornblenda mais escuras. As bandas foram deformadas por dobras apertadas a isoclinais, formando uma foliação de transposição (Norconsult, 2007).

Metagabbro

A Suíte Intrusiva da Serra Nicage faz parte de uma unidade extensa de Xixano e Negomano. É caracterizada por uma baixa assinatura radiométrica. Nesta suite parece haver transições graduais entre gabro, diorito, quartzo diorito e tonalito, vistas até no mesmo afloramento. Os afloramentos de gabro e quartzo diorito são geralmente arredondados e maciços e são de verde escuro a preto. O tonalito está bem exposto ao longo do lado Oeste da Serra Nicage. O meta-gabro é de grão fino a médio, e equigranular e a maior parte da piroxena parece estar alterada para anfíbola e biotite. Em alguns locais onde a deformação foi localizada, a rocha parece ser recrystalizada para anfibolito. Também são observados gabros pegmatíticos e diques gabróicos, de alguns centímetros a vários metros de largura (Norconsult, 2007).

Gnaiss anfibolítico

O gnaiss anfibolítico é uma das unidades mais comuns encontradas no complexo Xixano e abrange uma grande área. Ocorre em variedades com grãos finos foliados, grãos grosseiros maciços e bandado. Embora muitos dos gnaisses anfibolíticos tenham sido alterados e retrogradados para fácies de xistos verdes, existem evidências de que eles tiveram uma série de diferentes protólitos. As variedades de gnaiss anfibolítico de grão fino têm um tamanho de grão geralmente <1 mm, são bem foliadas, com uma forte lineação mineral e contêm anfíbola verde escuro a preto. Granadas do tamanho de mm são bastante comuns. O gnaiss anfibolítico de grão fino tende a ser homogêneo, consistindo em anfíbola + plagioclase + clorito menor e quartzo. Onde o anfíbola domina, a plagioclase ocorre intersticialmente (Norconsult, 2007).

Charnockitos

As rochas charnockíticas variam de mais quartzosas, charnockitos marrom claro a granulitos máficos mais escuros contendo granada acessória. São geralmente bandadas, mostrando uma granulação fina, cor cinzento escura a marrom, com bandas ricas em quartzo e piroxena. Os granulitos são frequentemente muito bem foliados, mas geralmente são maciços. Vários granulitos são de composição intermédia e de granulação mais fina. O bandamento composicional é comum e está ligada a variações na abundância de minerais ferromagnesianos. Alguns afloramentos também exibem veios leucocráticos de granulação grossa com granada arredondada com 1 cm de diâmetro. Esses veios são interpretados como fusão parcial (Norconsult, 2007).

2.1.3. Geologia Local

A área de estudo compreende uma sucessão geológica de granulitos/gneisses máficos a intermédios e félsicos e metassedimentos com orientação preferencial NNE e que pertencem ao Complexo Neoproterozóico de Xixano. Os granulitos/gneisses máficos são principalmente compostos por plagioclase - piroxena e menores teores de hornblenda, granada, micas e opacos, apresentando afinidades do fundo oceânico. Os granulitos félsicos consistem principalmente de quartzo e feldspato com teores variados de granada, mica, gahnite, magnetite e grafite. Metassedimentos bem desenvolvidos incluem quartzitos piriticos variando para feldspáticos e calco-silicatos (Figura 4).

Na parte SW da área de estudo comporta uma elevação cuja pseudo-estratigrafia simples consiste de granulitos máficos/ intermédios na base, cobertos por granulitos félsicos que hospedam os chapéus de ferro ‘*gossans*’, por sua vez estes são cobertos por unidades quartzo feldspáticas micáceas com pirite em que localmente quartzitos piriticos e calco-silicatos no topo da sequência. As lentes de xisto grafitoso ocorrem bem expostos nas margens do alvo da montanha SW.

Afloramentos de chapéus de ferro hospedados dentro dos granulitos félsicos são evidentes sendo que encontram se expostos continuamente por uma extensão até cerca de 1 km.

2.1.4. Geologia Estrutural

As principais unidades geológicas aflorantes na área de estudo compreendem uma orientação paralela a foliação regional (NE a ENE) e inclinação de 40 ° a 60 ° para o NW.

A deformação em granulitos inclui uma fábrica composicional S1 bem desenvolvida que é tipicamente interferida por uma foliação de crenulação S2 desenvolvida em um ângulo menor a S1. O resultado em muitas locais é uma fábrica S1 - S2 composto. A foliação crenulada S2 é dobrada por uma dobra aberta F3; não foi observada nenhuma foliação relacionada ao evento de dobramento. Apesar dessas dobras abertas de pequena escala, a estrutura gneissica tem uma orientação e inclinação relativamente consistente.

Zonas de falha, fractura e de cinzalhamento podem ser observados na imagem da Figura 4. A maior zona de fractura coincide com a tendência SW-NE do rio Messalo que é paralela a orientação das unidades geológicas regionais.

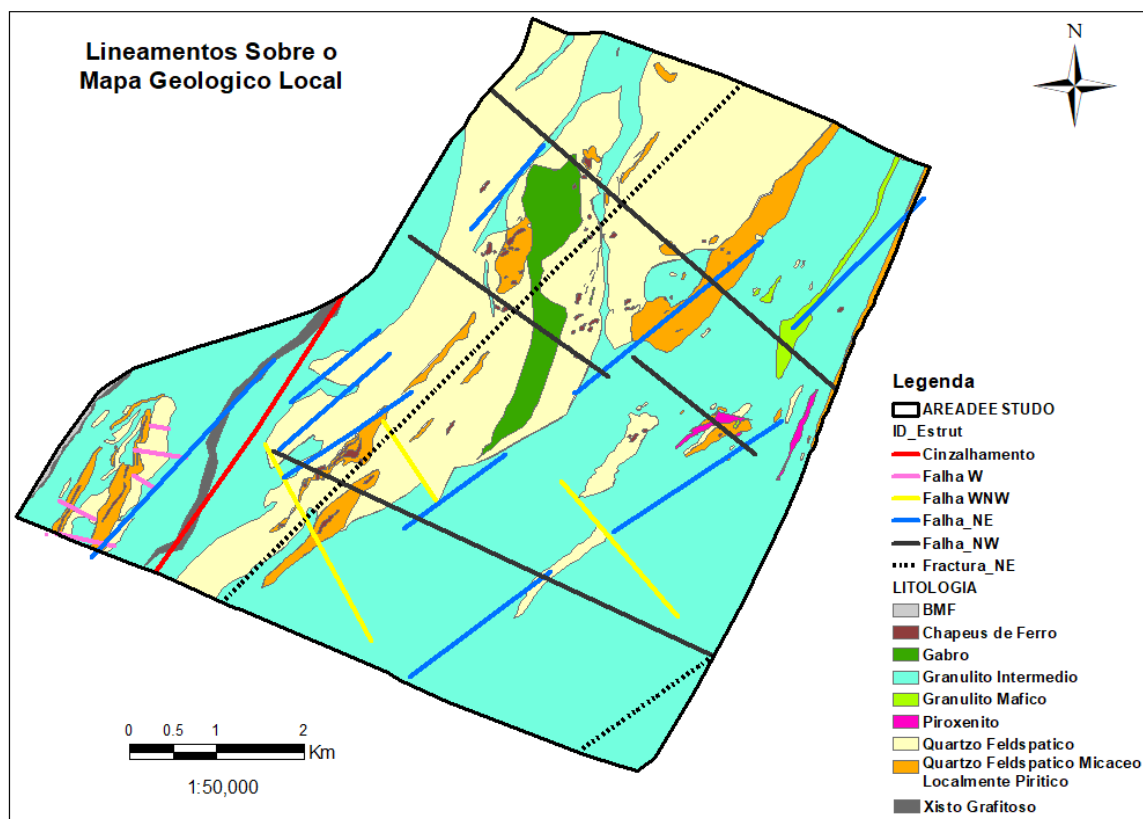


Figura 4. Mapa Geológico Local com Principais Lineamentos

2.1.5. Mineralizações

Evans (2014), sugere que a mineralização encontrada na área de estudo pode ser ajustada a um modelo de sulfuretos maciços vulcanogénicos (VMS). O tipo de mineralização dominante é “*stockwork*” ou veios de sulfuretos remobilizados, acompanhados por níveis variados da alteração hidrotermal típica das rochas hospedeiras.

Os próprios sulfuretos também foram afectados pelo metamorfismo e pela deformação. Lentes semi-maciças de pirrotite-esfalerite que estão sempre associadas a pegmatitos leucogabroicos, podem ter sido concentradas ou remobilizadas juntamente com fusão de silicato hidratado, nos centros das dobras isoclinais F2. O pequeno volume de fusão cujo produto é rico em Pb-Cu-As-Sb-Bi-Ag-Au pode ter migrado mais tarde destas zonas, cristalizando dentro ou nas margens do veios remobilizados e pré-existente de pirrotite-calcopirita.

Os principais minerais da mineralização presentes na área de estudo são a pirrotite (variedades monoclinica e hexagonal), pirite, calcopirite e esfalerite. Foi observada pouca galena. O magnetismo da pirrotite é variável, sugerindo proporções variadas de pirrotita monoclinica e hexagonal. A pirrotite é mais fortemente ou mais consistentemente magnética, quando ocorre junto com a pirite na rocha (Evans, 2014).

O fraco conteúdo de Pb, Evans (2014), conclui que existe um forte zoneamento de metais no depósito pré-metamórfico, ou que um pequeno volume de massa rica em Pb-Cu foi extraído de corpos de sulfuretos semi-maciços e migrou para fora do sistema, ou redistribuído para a zona distal.

A primeira explicação se encaixaria na distribuição de Cu na zona de *stockwork* / *stringer* e zinco mais no corpo maciço. No entanto, o facto de Pb mostrar a afinidade mais forte com as zonas periféricas externas sugere-me que foi mobilizado como fusão parcial, com parte do Cu (e provavelmente sulfossais e metais preciosos como Au, Ag, As, Bi, Sb e Te) e reprecipitados distalmente da mineralização principal rica em Fe-Zn

2.1.6. Tipo de Depósito

A mineralização na área de estudo, embora não seja económica no actual estágio de prospecção e pesquisa, é típica de um depósito de sulfuretos maciços vulcanogénicos (VMS). A geologia local e a geoquímica suportam essa interpretação para a origem da mineralização e o facto este tipo de depósitos ocorrer frequentemente em distritos (Pohl, 2011). Esta informação é ainda reforçado por Evans (2014) quando diz que o modelo de depósito é VMS do tipo *Broken Hill*. Com base neste modelo, a mineralização poderá ter sido formada no fundo oceânico, pela exalação de fluidos hidrotermais contendo metais e pelo acumulo de sulfuretos "maciços" ou por deposição/ substituição na subsuperfície.

A presença de chapéus de ferro expostos aleatoriamente, aflorando em mais de 1km de extensão contínuo, suportam o conceito de um distrito de depósitos VMS. A geologia local sugere que a mineralização ocorre na ruptura entre o vulcanismo máfico e félsico em uma sequência predominantemente vulcânica máfica. Apoiando este conceito está a presença de quartzitos piríticos (protólitos, cinzas finas piríticas distais a centros vulcânicos), quartzitos com *gondites* / spessartina (protólito, cherts manganíferos distais) bem como zoneamento de metais básicos na mineralização e halos de alteração de magnésio e alumínio acompanhando a mineralização (Pohl, 2011).

A mineralogia das rochas da área de estudo, sugere uma sequência de zoneamento metamorfizado de minerais mais magnesianos, ricos em biotita e cordierita no murro (sequencia inferior) e mais aluminosa no tecto (sequencia superior) com gnaisses feldspato-quartzo-granada. Tipicamente, os depósitos VMS são fortemente compostos por clorite, isto é, metassomatismo de magnésio, no murro, e metassomatismo de lixiviação e potássio no tecto, que neste caso é expresso com aumento de feldspato e granada e depleção de biotita e cordierita. Os dados de ensaios laboratoriais mostram uma seção inferior rica em cobre e superior rica em zinco, reflectindo a diminuição da solubilidade do cobre com a diminuição da temperatura do fluido (Pohl, 2011). Este é um padrão de zoneamento de metal normalmente encontrado em depósitos VMS (Pohl, 2011).

3. REVISÃO DA LITERATURA

3.1. Conceito de Principais Termos Usados no Trabalho

Nesta subsecção descrevemos os principais conceitos aplicados no trabalho:

Prospecção e Pesquisa Mineira: é o processo de localização de depósitos minerais não descobertos. Pode ser realizado em várias escalas. A de pequena escala, envolve o uso de todas evidências disponíveis para identificar regiões ou alvos com alto potencial para depósitos não descobertos. As equipes de prospecção e pesquisa, fazem a planificação dos trabalhos de campo detalhados e colecta de dados para um segundo estágio em uma escala mais grande. Mais uma vez, as regiões com elevado potencial são identificadas, para acompanhamento detalhado. O resultado, após novos ciclos de colecta de dados e avaliação, é a selecção de alvos de perfuração (IAEA, 1994).

Avaliação de recursos minerais: corresponde sensivelmente ao primeiro estágio da prospecção e pesquisa mineral, ou seja, a selecção de alvos regionais promissores. Também é frequentemente associado a uma previsão real do número, tamanho e valor monetário possível dos alvos minerais (IAEA, 1994).

Recursos minerais: "são concentrações de materiais rochosos que podem ser utilizados pelo homem. Por exemplo: ferro, cobre, zinco, ouro, materiais de construção e outras substâncias metálicas e não metálicas. Petróleo, gás natural, carvão mineral e minerais radioactivos (Ex: U, Th) estão incluídos no grupo dos recursos energéticos" (Hasui *et al.*, 2012).

Mapeamento de potencial mineral: é o processo de identificação de vários alvos de acordo com a favorabilidade para depósitos minerais. A aplicação de modelos de depósito mineral é importante tanto para a prospecção e pesquisa mineira assim como na avaliação de recursos minerais (IAEA, 1994).

Depósito Mineral: é a concentração de um ou mais minerais metálicos, que podem ser de interesse económico a depender de estudos geológicos e do preço internacional de mercado do produto e dos custos associados à sua extracção (Vale, 2017). Um grupo de depósitos semelhantes pode ser representado por um depósito ideal, com todas as

características significativas que distinguem um grupo do outro. Este depósito ideal pode não existir, mas as características no geral constituem um 'modelo' de depósito (IAEA, 1994).

Sistemas de Informação Geográfica (SIG): as definições de SIG, são condicionadas pelo ambiente em que surgem e pela realidade dos problemas que ajudam a resolver (Pinto, 2009). Porém o maior argumento da chave da definição se encontra nos componentes de hardware e software que servem de plataforma de funcionamento dos SIG. Aronoff (1989), define os SIG como: “Conjunto de procedimentos, manual ou automatizado, utilizados no sentido do armazenamento, e manipulação de informação georreferenciada.” Diversas individualidades definem estes sistemas observando diferentes aspectos:

Cowen (1988) «Um sistema de apoio à decisão que envolve a integração de dados georreferenciados num ambiente orientado para a resolução de problemas»

Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography (1988) «Um sistema de hardware, software e procedimentos organizado de forma a possibilitar a aquisição de dados, gestão, manipulação, análise e visualização de dados espaciais, de tal modo que seja possível resolver problemas de planeamento complexos.»

Na verdade, os SIG resultam da conjugação de outras tecnologias, integrando ferramentas originárias de sistemas diferentes. A Figura 5, ilustra os três aspectos tecnológicos computacionais constituintes dos SIG segundo Antenucci *et al.*, (1991): Os Sistemas de Gerenciamento de Base de Dados (dados gráficos e não gráficos); procedimentos para obtenção, manipulação, exibição e impressão de dados com representação gráfica; e algoritmos de análise de dados espaciais.

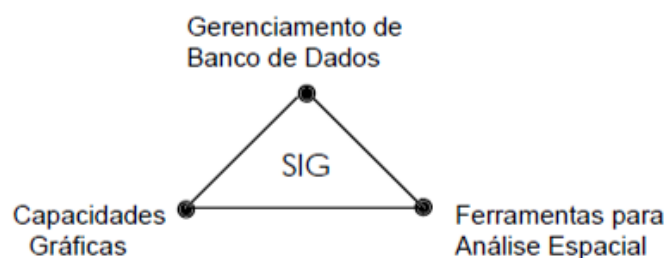


Figura 5. Aspectos tecnológicos de SIG segundo Antenucci *et al.*, (1991)

3.2.Métodos de Prospecção e Pesquisa de Depósitos Minerais

O processo de identificação e localização de minerais económicos é a primeira etapa do *ciclo de vida* dos depósitos minerais. Para alcançar esse objectivo, os geólogos aplicam tecnologias modernas em sequência de acordo com o tipo de depósito estudado (Hasui *et al.*, 2012). Principais métodos de prospecção e pesquisa de depósitos minerais:

Geologia - "A investigação puramente geológica, constitui o primeiro passo na procura e identificação de depósitos minerais. Essa investigação inclui a revisão da literatura geológica da região de interesse, levantamentos geológicos e topográficos em várias escalas e identificação dos parâmetros litológicos e estruturais que indiquem a existência de ambientes favoráveis às mineralizações" (Hasui *et al.*, 2012).

Deteção Remota (DR) - "Constitui hoje uma etapa essencial e pouco dispendiosa para auxiliar no mapeamento regional assim como pormenorização das áreas de interesse. A DR é uma ferramenta de grande valor para identificação de estruturas geológicas, litologias, alteração hidrotermal e depósitos minerais associados" (Hasui *et al.*, 2012).

Geofísica - "Consiste na pesquisa e na caracterização de depósitos minerais e rochas encaixantes comparando as variações das propriedades físicas (magnetismo natural, condutividade eléctrica, radioactividade ou densidade). Valores medidos que diferem das rochas circundantes são chamadas “anomalias” e podem indicar depósitos minerais.

Geoquímica - "Os levantamentos geoquímicos normalmente incluem: (i) Amostragem de sedimentos activos (riachos, rios etc.); (ii) Como foi Amostragem de solos (não transportados) e (iii) Amostragem de rochas. Técnicas laboratoriais são utilizadas para examinar concentração dos elementos químicos contidos nas amostras. A análise e interpretação dos resultados pode indicar áreas favoráveis a mineralizações" (Hasui *et al.*, 2012).

Sondagem - "Resultados positivos de levantamentos geofísicos, geoquímicos, podem ser verificados por sondagens. Por ser dispendiosa, a sondagem a diamante é usada em área investigada que tenha grande possibilidade de conter um depósito mineral. A etapa final consiste na amostragem e análises químicas de partes do testemunho de sondagem para verificação dos teores da mineralização" (Hasui *et al.*, 2012).

3.3.Deteccção Remota no Mapeamento de Alteração Hidrotermal

A Alteração hidrotermal é definida como qualquer alteração de rochas ou minerais pela reacção de fluidos hidrotermais com fases sólidas preexistentes (Shanks III, 2012). A alteração hidrotermal pode ser isoquímica, como o metamorfismo, e é dominada por mudanças mineralógicas, ou pode ser metassomática e resultar em adição ou remoção significativa de elementos. Onde a alteração é intensa, pode resultar em mudanças significativas de volume (Shanks III, 2012).

Os dados de detecção remota são bastante utilizados no mapeamento de diferentes litologias, depósitos minerais e zonas de alteração mineral em diversos tipos de depósitos (Abuzied *et al.*, 2016; Alimohammadi *et al.*, 2015; Pour *et al.*, 2015; Pour *et al.*, 2012; Hosseini *et al.*, 2014a,b; Rajendran *et al.*, 2014; Rajendran *et al.*, 2013; Shahriari *et al.*, 2013; Honarmand *et al.*, 2012; Hosseini *et al.*, 2011)

Vários estudos no mapeamento de zonas de alteração em torno de depósitos de sulfuretos foram efectuados (John *et al.*, 2010; Abuzied *et al.*, 2016; Alimohammadi *et al.*, 2015; Pour *et al.*, 2015; Pour *et al.*, 2012; Hosseini *et al.*, 2014a,b; Rajendran *et al.*, 2014; Rajendran *et al.*, 2013; Shahriari *et al.*, 2013; Honarmand *et al.*, 2012; Hosseini *et al.*, 2011; Rajendran *et al.*, 2017). Os depósitos estão associados a assembleias de alterações hidrotermais, incluindo a propílica, argílica e fílica (ou sericitica). O intemperismo tem um impacto nas assembleias de alteração primárias na produção de zonas oxidadas.

O mapeamento de zonas alteradas, especialmente na identificação das zonas próximas do minério, é importante na pesquisa de depósitos VMS (Rajendran *et al.*, 2017). É neste contexto que o presente trabalho dá um enfoque no mapeamento de zonas de alteração hidrotermal associadas ao depósito de VMS da área de estudo através de bandas espectrais ASTER e métodos de processamento de imagens estabelecidos com a finalidade de integração no mapa final de favorabilidade.

3.4.SIG e Prospecção e Pesquisa de Depósitos Minerais

Como foi argumentado na secção 3.2., a prospecção e pesquisa mineira é considerada um conjunto de operações iniciais no fluxograma de operações mineiras onde o factor principal é a avaliação. É uma actividade necessária antes de se tomar uma determinada decisão acerca da viabilidade económica de um depósito.

Nela faz-se uma selecção de parâmetros e factores que influenciam e controlam a localização de depósitos minerais. Neste caso a análise de Custos Vs Benefícios deve ser positiva em cada fase de tomada de decisão de transição de um nível de conhecimento para o outro.

Uma análise de métodos de pesquisa por forma a escolher mais ideias para a identificação de anomalias devidas, deve ser feita inicialmente.

A selecção de áreas de interesse para trabalhos de seguimento, é feito a partir de sobreposição de vários factores investigados. No passado envolvia uma análise feita manualmente entre as relações dos factores através de mesas de luz, o que de certa forma retardava o tempo de análise, manipulação e actualização dos dados.

Com a evolução das técnicas de processamento, armazenamento e manipulação de dados, alavancou a criação de programas apropriados para dados espaciais. No entanto, os SIG constituem um dos produtos mais importantes, originários do desenvolvimento tecnológico, e que são ferramenta computacional essencial de geoprocessamento.

A integração de dados de prospecção e pesquisa mineira colhidos no campo tem sido efectuado pelos SIG por forma a dar uma interpretação mais precisa para novas abordagens. São várias actividades de pesquisa geológica que foram efectuados com a aplicação de SIG, por exemplo:

- Orange *et al.*, (1999) aplicaram os SIG na identificação e previsão de áreas vulneráveis a acidentes geológicas na Califórnia, EUA;
- Brew *et al.*, (2000) aplicou os GIS para estudar a evolução geológica da Síria;

- Akcay (2004) aplicou SIG no campo da geologia ambiental para estudar o impacto ambiental da mineração de metais pesados, como Cu, Zn e Fe na Turquia.
- Pawlowski (2000) fez o estudo do papel do SIG na exploração de petróleo;
- Seber *et al.*, (2000), fez um estudo onde mostrou as diferentes aplicações do SIG na geologia do Médio Oriente.
- Aly *et al.*, (2005), aplicou os SIG para estudos de geologia de engenharia para superar problemas geoambientais no desenvolvimento urbano.

Na determinação de estruturas geológicas, a presença de imagens geofísicas (ex: sísmica, magnética, radiométrica, etc.), de detecção remota e outros dados de campo é importante. Porém integração, interpretação, análise e preparação da informação de estruturas geológicas é feito numa plataforma SIG (Osman, 2012).

A manipulação de dados de pesquisa, visualização e interpretação integradas anteriormente proibitivas e demoradas as vezes impossíveis, são mais rápidas e fáceis usando a tecnologia GIS, permitindo uma análise mais rápida, precisa e com melhor qualidade com o produto final altamente acessível (Osman, 2012).

3.5. SIG no Mapeamento de Favorabilidade Mineral: Alguns Exemplos

A aplicação de SIG no mapeamento de favorabilidade mineral é muito importante por causa da sua interface conciliadora, disponibilizando vários métodos de análise com possibilidade de actualização constante dos seus *softwares*. Através de execução repetitiva de álgebra de mapas em conjuntos de dados espacialmente organizados, ferramentas SIG permitem desenvolver mapas de favorabilidade e dar uma previsão de ocorrências de mineralizações (Araujo *et al.*, 2002). Existem duas maneiras em como os modelos podem ser usados (Araujo *et al.*, 2002):

- Modelos relacionados com operações de álgebra de mapas;
- Modelos focados na importância das variáveis que definem o mapa.

A abordagem quantitativa baseada no conhecimento, é subjectiva com operações controladas por regras desenvolvidas de acordo com o modelo da mineralização. Nos modelos baseados em dados, as regras são desenvolvidas por uma análise empírica dos dados, onde os mapas de entrada são combinados usando modelos como a logística regressão, pesos de evidência ou análise de rede neural. Muitos autores têm aplicado modelos orientados pelo conhecimento e orientados com dados usando diferentes abordagens e diferentes ferramentas estatísticas (Bonham-Carter *et al.*, 1988; Bonham-Carter, 1994; Katz, 1991; Rostirolla *et al.*, 1998).

Nos modelos baseados no conhecimento, a ponderação individual é baseada em opinião de especialista ou uma análise estatística. Os conhecimento descritos em modelos geológicos ou de prospecção e pesquisa são usados para quantificação da favorabilidade mineral (Harris, 1984; Cox *et al.*, 1986)

São vários estudos de mapeamento de favorabilidade mineral. Exemplo:

- Benomar *et al.*, (2009), desenvolveram um modelo preditivo em SIG para mapeamento de áreas com favorabilidade de ocorrência de cobre, chumbo e zinco na área de Langping na China. Neste trabalho, foram aplicadas quatro características espaciais ou guias de prospecção e pesquisa mais relevantes na concentração de mineralizações que são: as zonas de alteração hidrotermal, zonas de falha, tipo de rocha hospedeira e lineamentos.

- Araujo *et al.*, (2002), fizeram uma modelação para o mapeamento de favorabilidade mineral numa área com mineralização de metais na província Metalogénica do Vale do Ribeira no Brasil, que consistiu na análise multicritério de dados geológicos. Fizeram a sobreposição dos factores analisados através da combinação linear ponderada e média ponderada. Araujo *et al.*, (2002) mostraram que a análise da média ponderada ordenada fornecia os melhores resultados, com mapas de favorabilidade mostrando um grande número de classes ocupando áreas.
- Bonham-Carter *et al.*, (1988), fizeram um estudo para o mapeamento de favorabilidade mineral de Ouro a partir de uma abordagem orientada pelo conhecimento para uma área localizada a sudeste da Nova Escócia, no Canadá. O estudo aplicou a regra de Bayes para combinar os factores importantes para a previsão de ouro. Os pesos dos factores foram determinados usando a localização de depósitos conhecidos. A partir das características do modelo do depósito, foram criadas áreas de influência para análise dos factores.
- Katz (1991), aplicou a teoria da probabilidade de Bayes e fuzzy lógica para desenvolver um mapa baseado no sistema de conhecimento. Segundo Katz (1991), um sistema de conhecimento é aquele que simula um conhecimento. Os sistemas de conhecimento aplicam regras dadas por peritos, as respostas dadas por utilizadores, sob a forma de informação digital.
- Rostirolla *et al.*, (1998), aplicaram uma metodologia para definir áreas favoráveis para exploração mineral na Bacia do Recôncavo (petróleo) e Cinturão Ribeira (exploração mineral). A sua metodologia consistiu em ponderar variáveis da pesquisa exploratória, aplicando modelação por pesos de evidência (um método bayesiano) e componente principal análise (um método multivariado). Calcularam os pesos usando as frequências de depósito com variáveis diagnósticas.

3.6. Processo de Integração de Dados Espaciais em SIG

Segundo IAEA (1994), o processo de integração de dados espaciais em SIG pode ser resumido em três principais etapas: (1) Construção da base de dados, (2) Processamento de dados espaciais; e (3) Aplicação dos modelos de integração (Figura 6).

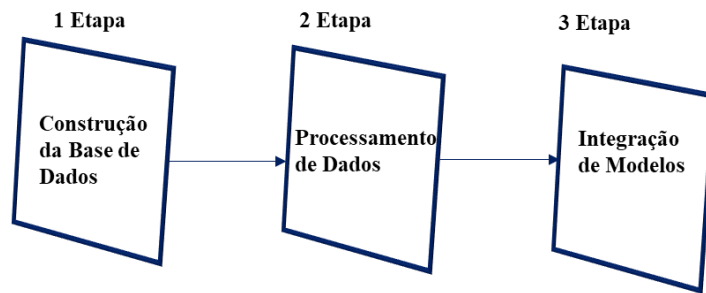


Figura 6. Integração de dados espaciais como um processo de três etapas.

O processamento de dados espaciais da etapa 2 abrange várias actividades como: o pré-processamento, análise, aperfeiçoamento e classificação de camadas de dados. O pré-processamento inclui edição de dados e transformação geométrica, transformação entre as estruturas de dados-vectorial para matricial ou matricial para vectorial.

A etapa 3 envolve a aplicação de modelos para combinar ou integrar camadas. No caso da prospecção e pesquisa mineira, as camadas que são extraídas e melhoradas na etapa 2 são geralmente os dados a serem usados como evidências para a favorabilidade mineral. A visualização envolve tanto a etapa 2 como a 3.

O procedimento de integração de dados espaciais é apoiado por um modelo conceptual. Este fornece as directrizes para cada etapa do processo, a selecção de fontes de dados adequadas na etapa 1; sugere o aperfeiçoamento próprio e possíveis associações na etapa 2; selecção e ponderação de evidências de favorabilidade na etapa 3.

3.7. Modelação de Integração

Um modelo é um filtro que ajuda a extrair informação de grandes volumes de dados complexos. A vantagem na utilização de modelos residem na melhor compreensão de fenómenos e na possibilidade de se testarem alternativas (Cabral, 2016).

O modelo de integração usa símbolos lógicos e matemáticos para combinar camadas de dados. Geralmente é um conjunto de regras, ou equações, que relacionam um conjunto de mapas de entrada a mapas de saída (Tomlin, 1990). A modelação de integração pode ser feita com uso de ferramentas de SIG e consiste de vários tipos, por exemplo modelos descritivos e preditivos.

3.7.1. Modelos Descritivos e Preditivos

Na pesquisa mineira, os modelos descritivos combinam mapas de entrada sem qualquer objectivo preditivo. Os modelos preditivos, usam métodos de combinação que tentam prever o potencial mineral. Nos modelos preditivos, existem dois conceitos segundo

- O uso da estatística (*data driven*), para calcular os parâmetros do modelo usando depósitos minerais conhecidos em uma área de treinamento; e
- O uso de especialistas de prospecção e pesquisa mineira (*knowledge driven*), como base para combinar evidências de favorabilidade (IAEA 1994)

A abordagem estatística é mais objectiva, mas tem a desvantagem da área de treinamento utilizada e estimar parâmetros do modelo muitas vezes inadequados. Por exemplo, a área de prospecção e pesquisa pode ser incompleta, ou depósitos conhecidos sejam poucos e difíceis de classificar de acordo com o modelo de depósito exacto, e a área de treino não será tão suficiente para assimilar a área de previsão IAEA (1994).

A abordagem do conhecimento de especialistas é atraente porque os critérios do modelo do depósito podem ser explicitamente usados e atraem muitos geólogos porque simula seu próprio pensamento. Este processo é muito subjectivo, os parâmetros do modelo devem ser ajustados para cada área do projecto.

Métodos Híbridos, usam juntos os conceitos estatísticos e sistemas de peritos na área.

3.8. Análise Multicritério em SIG

A análise multicritério, é uma ferramenta matemática que permite comparar diferentes alternativas, fundamentada em vários critérios, com o objectivo de direccionar os tomadores de decisão para uma escolha ponderada (Roy, 1996).

De acordo com Eastman *et al.*, (1995) e Eastman, (1997), a análise multicritério em SIG pode aplicar sobreposição Booleana: a combinação linear ponderada e a média ponderada ordenada. Estas sobreposições são modificações da técnica de índice de sobreposição (*Index overlay*). Estas técnicas consistem na aplicação de pesos às camadas antes da sobreposição.

O método de combinação linear ponderada, é mais usado por ser de fácil implementação e entendimento em SIG para tomadores de decisão (Araujo *et al.*, 2002): Utiliza operações de álgebra de mapas e modelagem cartográfica.

O método de média ponderada ordenada, reduz as variáveis a valores binários e combina-os usando operadores booleanos como AND (intersecção) e OR (união), sendo possível variar os pesos de ordenação, desde que o somatório dos mesmos seja igual a um. Este método considera o peso ordenado e permite ponderar as variáveis de forma relativamente ordenada e também considera o peso absoluto de cada variável. O peso ordenado é usado para alterar os pesos (critérios) de cada mapa (variável) antes da sua aplicação.

3.8.1. Sobreposição Ponderada (*Weighted Overlay*)

A Sobreposição ponderada, é uma das abordagens mais utilizadas para análise de sobreposição para resolver problemas multicritério, como selecção de locais e modelos de adequação (ESRI, 2019).

A análise de sobreposição é um grupo de metodologias aplicadas na selecção ideal de locais ou na modelagem de adequação. É uma abordagem para atribuir uma escala comum de valores a entradas variadas e diferentes para criar uma análise integrada (ESRI, 2019).

Os modelos de adequação definem os melhores locais ou mais preferidos para um fenómeno específico. A análise de sobreposição ponderada, geralmente envolve o exame de muitos factores diferentes. Por exemplo, a selecção de um local adequado para mineralização de cobre e zinco significa avaliar parâmetros relevantes para a mineralização de cobre e zinco dentro de uma determinada área, tais parâmetros podem incluir litologia, alterações hidrotermais, geoquímica, geofísica, estruturas geológicas entre outros. Esses dados existem em diferentes *rasters* com diferentes escalas de valores (Botwe *et al.*, 2018).

Os diferentes factores em análise na sobreposição ponderada podem não ter igual importância. Por exemplo, pode ser que a geoquímica tenha boa correlação com a mineralização de cobre e zinco que a distância a estruturas geológicas. Neste caso, a importância desses parâmetros é determinada pelo modelador e mostrada como pesos que somam 100% ou 1 (Botwe *et al.*, 2018).

3.8.2. Etapas de Análise de Sobreposição

As etapas gerais para execução de uma análise de sobreposição são segundo ESRI, (2019) as seguintes:

- (i) Definição do problema.
- (ii) Dividir o problema em submodelos.
- (iii) Determinar as camadas significantes.
- (iv) Reclassificar ou transformar os dados das camadas.
- (v) Ponderar as camadas de entrada.
- (vi) Adição ou combinação das camadas.
- (vii) Selecção dos melhores locais.
- (viii) Análise.

As etapas 1 a 3 são comuns para quase todas as resoluções de problemas espaciais e são particularmente importantes na análise de sobreposição.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho, enfoca a análise da favorabilidade mineral de Cu e Zn em Montepuez, utilizando técnicas de SIG. A metodologia empregue baseia-se no desenvolvimento de modelo de exploração aplicando técnicas de geoprocessamento para dados litológicos, geoquímica de solos, estruturas lineares, geofísica (FTG, VTEM e Magnetometria) e alteração hidrotermal (Bonham-Carter *et al.*, 1988).

Araujo *et al.* (2002), recomenda o uso de SIG na análise de favorabilidade aplicando o conjunto de dados acima mencionados. Esta técnica requer eficiência na organização e manutenção de grandes bases de dados gerados durante a prospecção e pesquisa mineral (Araujo *et al.*, 2002).

A análise multicritério de dados através da sobreposição ponderada foi aplicada no estudo. Foram concebidas classes de peso para os atributos das variáveis envolvidas no processo. Foi feita a atribuição ou ponderação para as variáveis de acordo com a influência ou associação espacial e genética em relação aos processos de mineralização que favorecem a ocorrência de Cu e Zn.

Detalhes de *Softwares* aplicados no trabalho:

Para modelação: foi aplicado o Model Builder do ArcGIS Desktop 10.2, com aplicações integradas de ArcCatalog e ArcToolbox.

Para o processamento de imagens satélite (ASTER L1T): ENVI 5.2

Modelo de Base de dados: desenhado a partir do ArcGIS Diagrammer da ESRI

Por forma a alcançar os objectivos traçados, este trabalho compreendeu três fases descritos a seguir e resumidos na Figura 7:

Fase I: Pesquisa Bibliográfica e Geração da Base de Dados

- Consistiu na consulta bibliográfica de trabalhos similares e outros estudos feitos na região Norte de Moçambique;
- Recolha de todos os dados necessária para o estudo;
- Geração de uma base de dados com integração da informação necessária para geração do modelo nomeadamente: dados vectoriais digitalizados com litologias e estruturas lineares, imagens satélites (ASTER) processadas e classificadas; dados matriciais de geoquímica de solos originários de métodos de interpolação e de levantamento geofísico electromagnético, magnético e gravimétrico já processados.

Fase II: Geração do Modelo de Favorabilidade

- Processamento de dados e modelação de integração implementado a partir da função *Model Builder* do ArcMap. Consistiu essencialmente no uso de diversas ferramentas de geoprocessamento.
- Selecção de variáveis geognósticos nomeadamente anomalias geoquímicas, litológicas, estruturas lineares, alterações hidrotermais e anomalias geofísicas.
- Pontuação dos mapas e atribuição de pesos das variáveis.
- Combinação de índices de favorabilidade de ocorrência de minerais de Cu & Zn

Fase III: Modelo Final, Teste e Redacção do Relatório

- Produção do mapa final de favorabilidade de Cu & Zn
- Teste/Validação do modelo
- Elaboração do trabalho escrito, correcção pelo orientador, revisão, e entrega aos serviços académicos

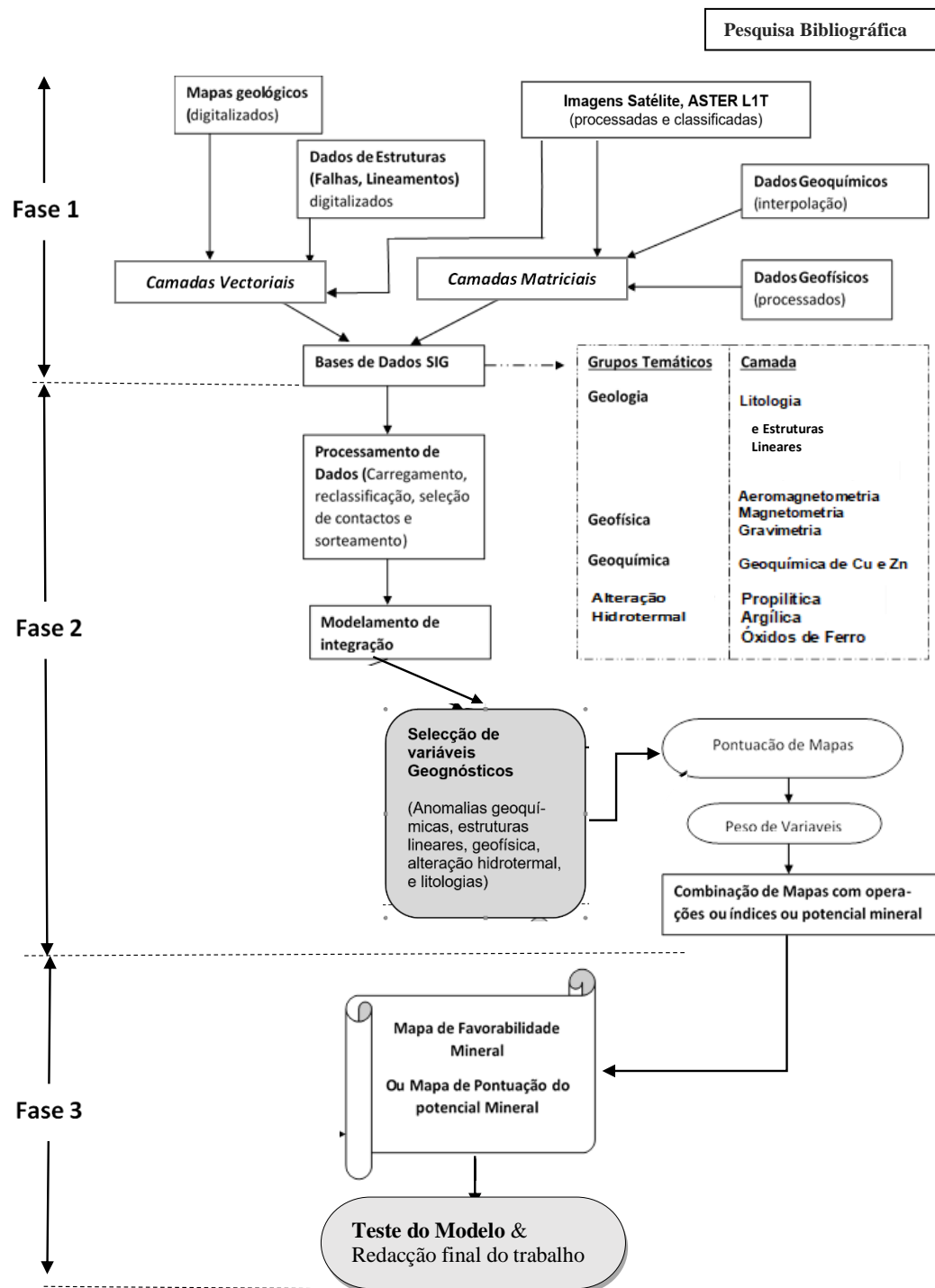


Figura 7. Fluxograma com indicação de principais etapas aplicadas na elaboração do trabalho.

4.1.Dados

A maior parte de dados aplicados no estudo são provenientes de um programa de prospecção e pesquisa geológica, exercida localmente pela empresa Rovuma Resources Lda. As imagens satélites foram adquiridas no endereço electrónico (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). A tabela 1, faz o resumo dos dados aplicados.

Tabela 1 Principais tipos de dados aplicados no estudo.

Tipo de dados	Descrição	Fonte
Litologia e Estruturas Lineares	Mapas geológicos na escala 1:50.000. São dados em polígonos e linhas no modelo vectorial convertidos posteriormente para modelo matricial.	Rovuma Resources
Geoquímica: - Solos (Cu e Zn)	Dados de resultados de amostragem geoquímica intermédia e de seguimento da área de estudo. Dados brutos estão em Excel e convertidos em pontos e posteriormente feito a interpolação por krigagem.	Rovuma Resources
Geofísica (aérea): - Magnetométricos - VTEM - Gravimétricos	Dados de levantamento geofísico aéreo modelados. Disponibilizados em modelo Matricial	Rovuma Resources
- Dados de Imagem Satélite	ASTER L1T. Dados processados usados para extrair alteração hidrotermal.	Earthexplores, USGS https://earthexplorer.usgs.gov/

4.1.1. Litologia

Consiste em mapa vectorial na escala 1:50000, composto por nove unidades litológicas. Este mapa, foi convertido para o modelo matricial (Figura 8) por forma a cumprir com os requisitos do modelo de favorabilidade concebido. A unidade quartzo feldspática micácea com/ sem pirite, constitui a marca de aproximação a mineralização de Cu e Zn na área de estudo (Pohl, 2011). As unidades de chapéus de ferro mapeados, representam zonas de alterações de sulfuretos na superfície em que podem ser de Fe, Zn, Cu ou ainda de outros elementos. Em unidades de granulitos intermédios e máficos que representam a maior extensão da área de estudo não foi observado nenhuma tendência de correlação com principais mineralizações de Cu e Zn.

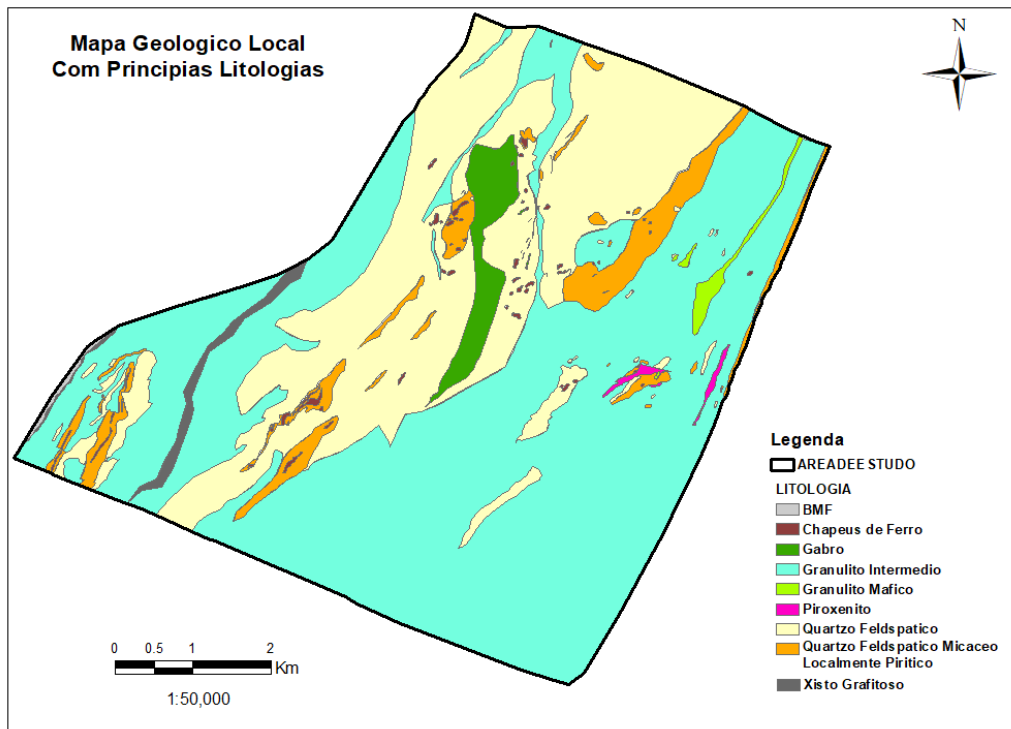


Figura 8. Mapa geológico local com principais litologias no modelo matricial.

4.1.2. Estruturas Lineares

Consistem de dados em linhas no modelo vectorial (Figura 9.a). Estes dados representam falhas com tendência NE, WNW, NW; zona de cinzalhamento e fracturas NE. São dados resultantes da interpretação de imagens geofísicas e observação no campo.

Para as estruturas Lineares, foi efectuada uma análise a partir da ferramenta *Multiple Ring Buffer* por forma a criar áreas de Influência nas proximidades das principais estruturas nomeadamente a 150m, 300m e 450m (Figura 9.b). Quanto mais próximo da principal linha da estrutura, maior é a favorabilidade de ocorrência de mineralização. A imagem vectorial resultante foi convertida em matricial para sua compatibilidade com as ferramentas de modelação.

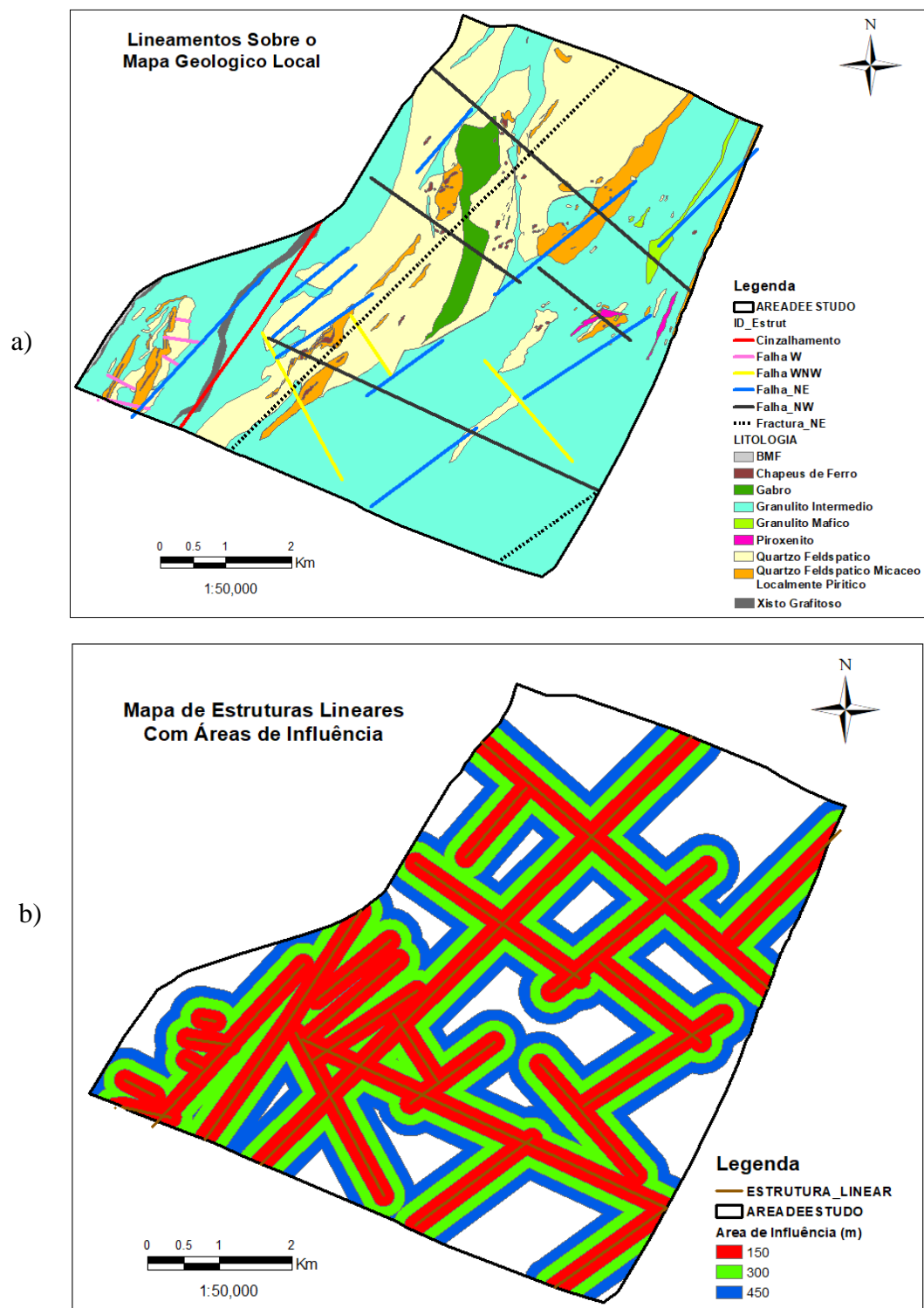


Figura 9. Dados de estruturas lineares da área de estudo. a) geologia com unidades litológicas em sobreposição com estruturas lineares. b) Estruturas lineares com respectivas áreas de influência a 150, 300 e 450m.

4.1.3. Geoquímica de Solos

A geoquímica desempenha um papel importante em qualquer investigação de ocorrência de minerais, já que ajuda a identificação e caracterização de fontes de anomalias e sistemas geológicos, especialmente quando a circulação de fluidos subterrâneos está presente (Buttinelli *et al.* 2013).

Os dados aqui apresentados, são de amostragem de solos com resultados de análises químicas de Cu e Zn. As amostras foram colhidas em duas fases (intermédia e de seguimento) num total de 8863. Uma malha de 400 X 100 X 25m foi aplicada na fase intermediária, isto é, espaçamento de 400m entre as linhas e em cada 100m da linha fez-se uma amostra composta em cada 25m. Para a amostragem de seguimento, aplicou-se uma malha de 100 X 50 X 25m de modo a detalhar as porções anómalas obtidas na fase intermédia.

4.1.3.1. Dados de Análises Químicas de Cu

Foram produzidas imagens com a distribuição das anomalias resultantes da análise química de Cu (Figura 10.a). Foi feita a interpolação por krigagem dos mesmos resultados por forma a integrá-los no modelo de favorabilidade concebido. A Krigagem, é uma predição linear ou uma forma de Inferência bayesiana. Que parte do princípio de que pontos próximos no espaço tendem a ter valores mais parecidos do que pontos mais afastados. A técnica de Krigagem assume que os dados recolhidos de uma determinada população se encontram correlacionados no espaço. Isto é, se numa área de estudo a concentração de Cu num ponto p é x , é muito provável que se encontrem resultados muito próximos de x quanto mais próximos se estiver do ponto p (princípio da geoestatística). Porém, a partir de determinada distância de p , certamente não se encontrarão valores aproximados de x porque a correlação espacial pode deixar de existir. A imagem da Figura 10.b, em modelo raster é resultante processo de krigagem feita para dados de geoquímica de Cu.

Foram criadas sete (7) classes de anomalias conforme a importância dos valores da concentração de cobre. A zona vermelha, representa concentrações de Cu mais elevadas e a azul representa concentrações de Cu mais baixas.

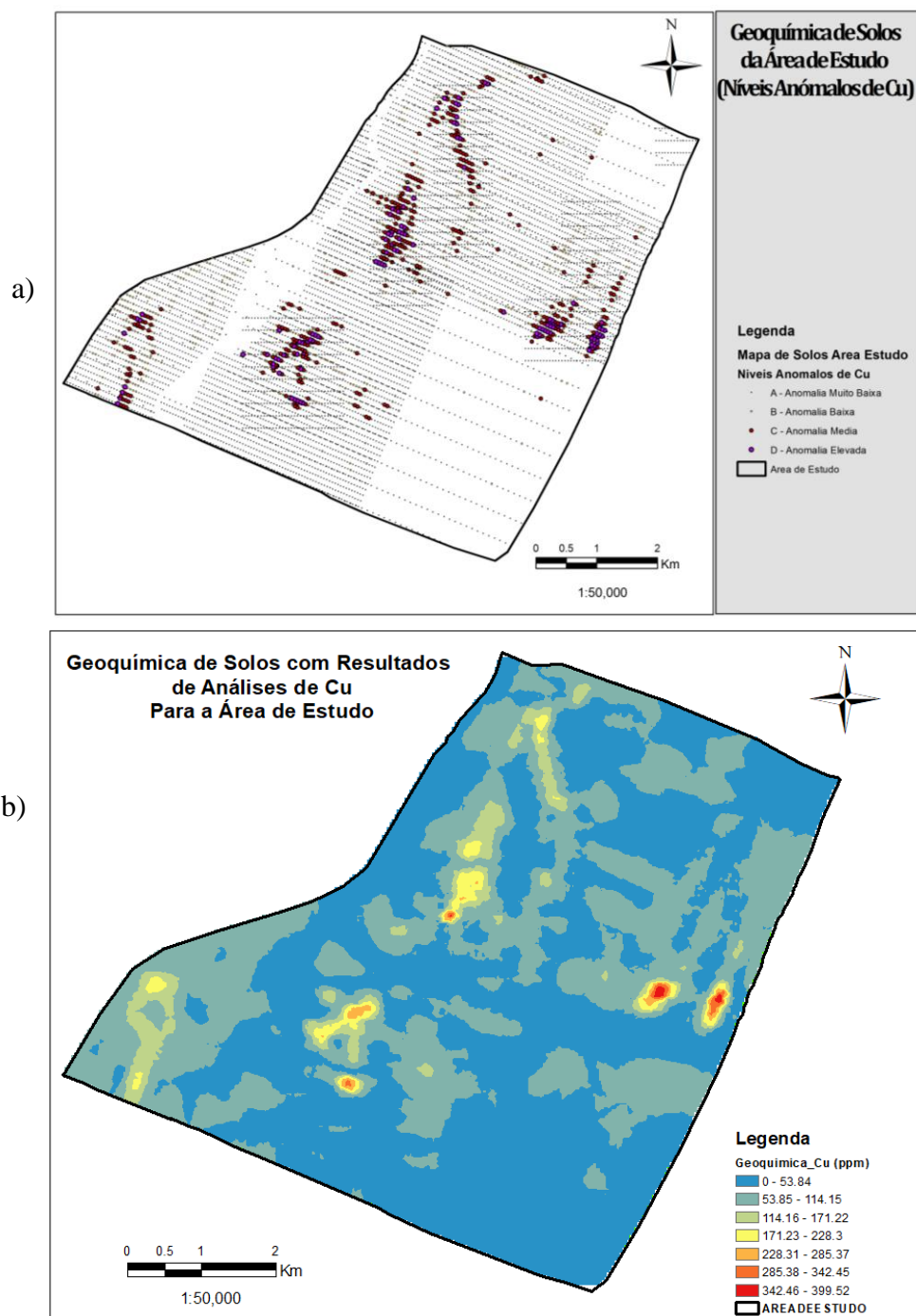


Figura 10. Dados de amostragem geoquímica de solos para o Cu. a) Resultados de analíticos de Cu em diagramas circulares. b) Interpolação por krigagem dos resultados analíticos de Cu.

4.1.3.2. Dados de Análises Químicas de Zn

A Figura 11.a), ilustra a distribuição dos dados de análises químicas de Zn referentes a área de estudo. Trata-se da representação de diferentes anomalias sendo que a letra D representa anomalias positivas e a letra A anomalias negativas.

Foi feita a interpolação por krigagem dos resultados de análises de Zn, por forma a integrá-los no modelo de favorabilidade concebido (Figura 11. b). A interpolação por krigagem usou a ferramenta *Kriging* do *spatial analyst* do ArcGIS. Para prever um valor de qualquer local não medido, a krigagem usa os valores medidos em torno do local de previsão. Os valores medidos mais próximos do local de predição têm mais influência sobre o valor previsto do que aqueles mais distantes. Na mesma figura, as áreas denotadas a vermelho têm alta concentração de zinco, seguidas pelas áreas amarelas enquanto que as representadas a azul têm baixa concentração de zinco.

A geoquímica de solos é muito importante na prospecção e pesquisa, pois, é um método directo que mede a quantidade exacta do mineral procurado.

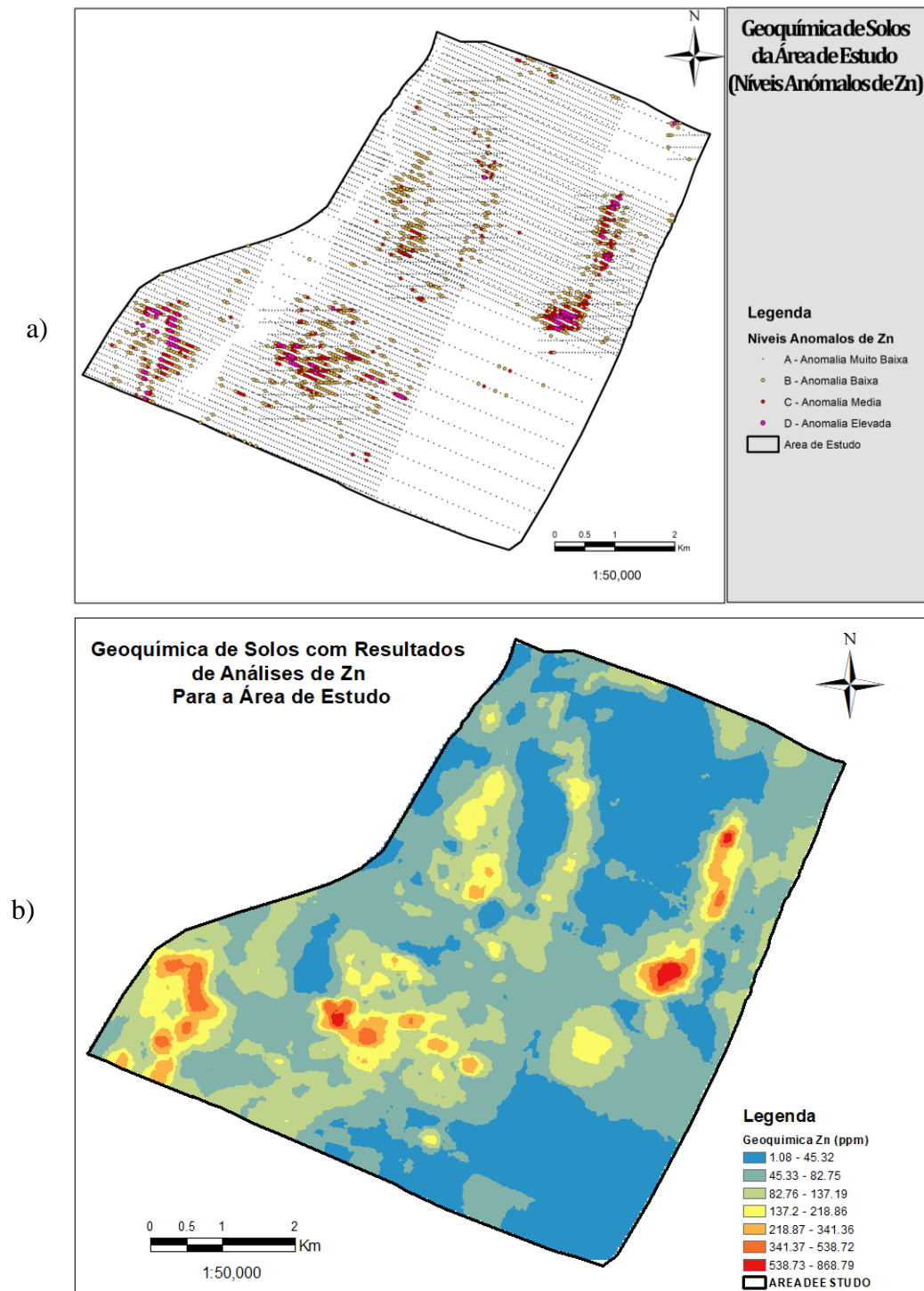


Figura 11. Dados de amostragem geoquímica de solos para o Zn. a) Resultados de analíticos de Zn em diagramas circulares. b) Interpolação por krigagem dos resultados analíticos de Zn.

4.1.4. Dados de levantamento Geofísico

No âmbito do trabalho, foram usadas imagens processadas no modelo matricial: gravimetria (FTG Tzz), magnetometria (RTP) e Electromagnetometria (VTEM).

4.1.4.1. Gravimetria - FTG Tzz

FTG, mede a variação de gravidade em todas as direcções do campo observados pelo contraste da densidade do material na subsuperfície. Os dados medidos são uma série de componentes independentes. Txx, Tyy e Txy que medem a variação do campo gravimétrico nos componentes horizontais enquanto Txz e Tyz medem a variação com a profundidade das componentes horizontais. Txx e Tyy, quando combinados podem fornecer uma medida única da variação da gravidade na componente vertical, Tzz. As informações das componentes são optimizadas para mapear geometrias complexas da geologia alvo que gera um contraste de densidade com a geologia da rocha encaixante.

Os dados gravimétricos (FTG Tzz) foram obtidos já processados no modelo matricial (Figura 12). O sinal gravimétrico elevado corresponde a 1.61mGal e é representado pela cor vermelha e o sinal mais baixo corresponde a 1.13mGal e é representado pela cor azul. O sinal médio é representado por cor verde a amarelo. Anomalias com sinal gravimétrico moderado a alto tem sido associada a mineralizações de Cu e Zn na área de estudo segundo geólogos da companhia de pesquisa. Porem há anomalias gravimétricas elevadas testadas por sondagens que se associam a granulitos máficos.

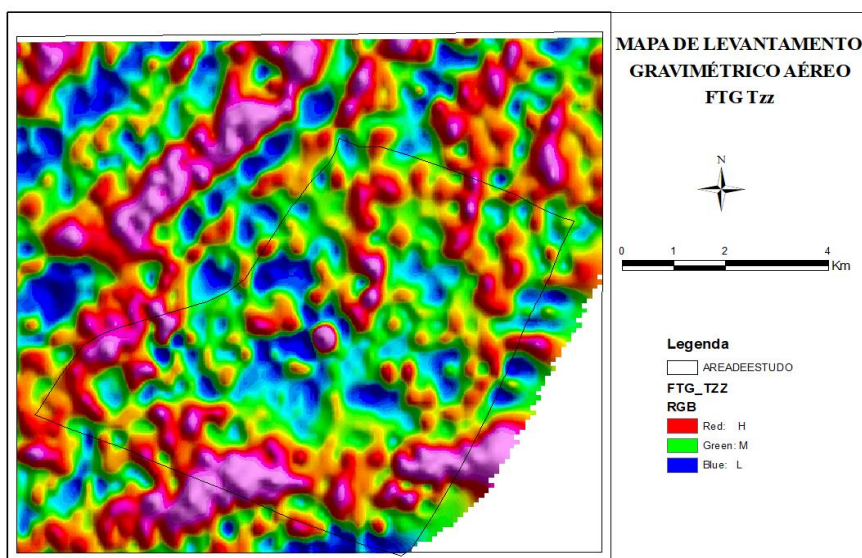


Figura 12. Imagem de levantamento gravimétrico aéreo *FTG Tzz* da área de estudo

4.1.4.2. Magnetometria - RTP

O campo magnético assim como o gravimétrico, revelam anomalias causadas por contrastes em propriedades físicas das rochas em profundidade. Estes métodos são usados para a identificação de anomalias potenciais e usam técnicas análogas de interpretação. A diferença é na medida em que a magnetização, que determina os efeitos magnéticos, tem magnitude e direcção; depende da susceptibilidade magnética e magnetização remanescente das rochas. Por outro lado, a atracção gravitacional depende da massa e é função da densidade. A força gravitacional envolve somente atracção, enquanto a magnética atracção e repulsão. Os efeitos magnéticos são também fortemente influenciados por traços de certos minerais, enquanto que os efeitos gravitacionais somente pelos constituintes principais da rocha (Blum, 1999).

A Figura 13, ilustra a imagem processada do levantamento magnético aéreo reduzido ao polo (RTP). O sinal magnético elevado corresponde a 32840nT e o mais baixo a 32106nT. Dados de sondagem efectuada, revelam que mineralizações de Cu e Zn estão associadas a anomalias com sinal magnético moderado a alto. Há presença da pirrotite magnética associada a calcopirite, esfalerite e pirite.

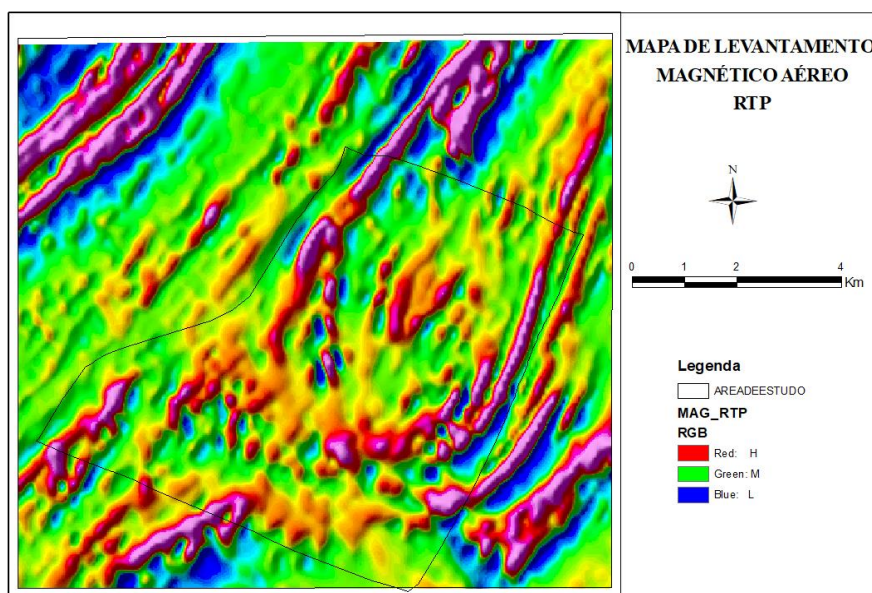


Figura 13. Imagem de levantamento magnético aéreo RTP da área de estudo

4.1.4.3. Eletromagnetometria - VTEM

O levantamento VTEM, é um sistema aerotransportado onde as bobinas transmissoras e receptoras são içadas por aeronaves e os dados são adquiridos continuamente ao longo de linhas de voo. A aplicação de métodos EM na prospecção deste tipo de depósito se baseia na identificação de anomalias consideradas prospectivas e na análise quantitativa dos condutores associados, por meio de modelagem e inversão em uma, duas ou três dimensões (Oliveira, 2014).

A Figura 14, ilustra a imagem processada de VTEM da área de estudo. A condutância máxima observada na área de estudo corresponde a 6.62mS e a mínima foi de 1.94mS.

Uma correlação positiva entre anomalias moderadas a elevadas de VTEM com mineralizações de Cu e Zn foi observada nos furos de sondagem feitos na área de estudo. Porém, a presença de corpos grafitosos, interfere de certa forma na aplicação de dados de VTEM. Para o efeito, o uso de outros dados geofísicos como a magnetometria e gravimetria é relevante para delinear corpos condutivos relacionados com corpos grafitosos e corpos condutivos relacionados com mineralizações de Cu e Zn.

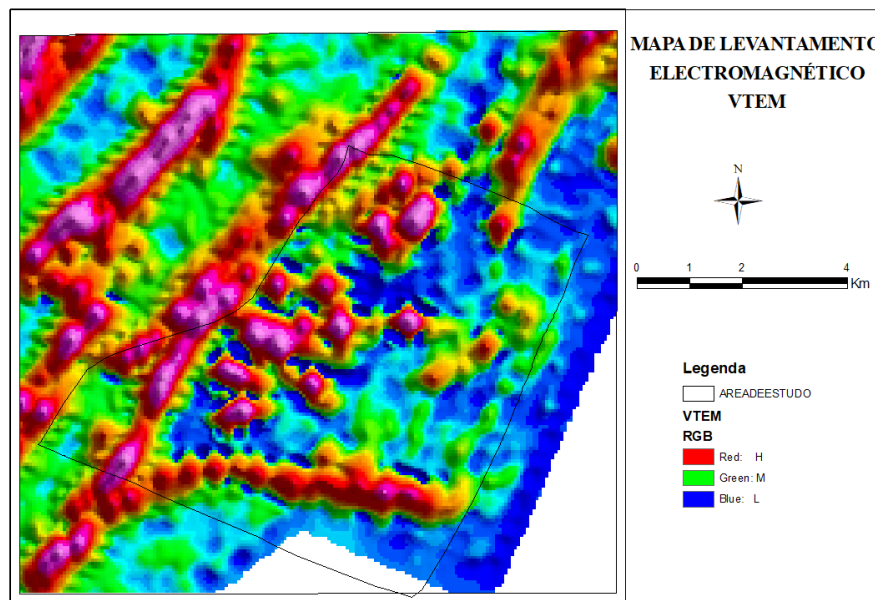


Figura 14. Imagem de levantamento electromagnético aéreo *VTEM* da área de estudo

4.1.5. Dados de Imagens Satélite – ASTER L1T

O objectivo do uso destes dados é o mapeamento de zonas de alteração hidrotermal. Imagens ASTER nível 1T (AST_L1T_00310142006074425_20150516145449_93128) de alta resolução, livres de nuvens e cobrindo a área de estudo, foram adquiridas pela *US Geological Survey (USGS) - Earth Resources Observation and Science Centre (EROS)* (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) a 14 de Outubro de 2006. São imagens GeoTIFF na projecção UTM Zona 37Sul com o Datum WGS-84, radiometricamente e geometricamente corrigidas. A imagem foi adquirida num período seco na área de estudo para reduzir o efeito da relação sinal / ruído (Kruse *et al.*, 2003).

O sensor ASTER possui uma resolução espectral suficiente para mapear zonas de alteração hidrotermal e depósitos VMS associados. Consiste de três subsistemas:

- **Visível e Infravermelho Próximo (VNIR)**, com três canais de gravação entre 0,52 e 0,86 μm com uma banda adicional voltada para trás para a gravação de modelos digitais de elevação (DEMs). Tem uma resolução espacial até 15 m
- **Infravermelho de comprimento de onda curto (SWIR)**, possui seis canais de gravação de 1,6 a 2,43 μm com uma resolução espacial de 30 m
- **Infravermelho térmico (TIR)**, possui cinco canais de registo cobrindo a região de comprimento de onda de 8,12–11,65 μm com uma resolução espacial de 90m.

Para o mapeamento de zonas de alteração, três etapas foram consideradas: a) pré-processamento; b) processamento; e c) mapeamento de alteração hidrotermal.

Foi aplicado o software ENVI, versão 5.2 e Arc GIS 10.2 para as três etapas.

4.1.5.2. Pré-processamento

Para os dados ASTER L1T, a correcção *crosstalk* foi efectuada no processo de geração de dados através da reutilização de algoritmos da cadeia de processo L1B (Abrams *et al.*, 2015), que visa remover o efeito do excesso de energia da banda 4 para bandas 5 e 9.

O Empilhamento de camadas (bandas VNIR-SWIR) foi efectuada para criar um arquivo de bandas VNIR e SWIR a partir de imagem georreferenciada. As bandas de entrada são reamostradas e reprojectadas para um tamanho de pixel comum de 30m.

Correcção atmosférica

A correcção *Fast Line-of-site Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes* (FLAASH) foi aplicada para reaver a reflectância da superfície (Perkins *et al.*, 2012). O principal objectivo do algoritmo FLAASH é eliminar os efeitos atmosféricos causados por espalhamento e absorção molecular e por partículas das medições de "radiância-no-sensor" a fim de recuperar valores de "reflectância à superfície" (Anderson *et al.*, 2002).

Apos a redução do tamanho de dados (*RESIZE*), reduziu-se o ruído (Noise reduction) do ASTER SWIR, a partir da análise de transformação mínima do ruído (MNF). Neste caso o sexto canal MNF contém ruído porque o *eigenvalue* é o mínimo. Os dados do ASTER SWIR foram compilados usando o MNF inverso dos 5 canais MNF.

O Índice de Pureza do Pixel (PPI) foi usado para encontrar os pixels espectralmente mais puros em imagens multiespectrais e hiperespectrais. A função PPI pode criar uma banda de saída ou continuar suas iterações e adicionar os resultados a uma banda de saída. O PPI é executado em resultado de transformação MNF, excluindo as faixas de ruído. Os resultados do PPI são geralmente usados como entrada no Visualizador n-D.

O ANEXO A, ilustra as diferentes fases do pré-processamento de dados de imagens satélite aplicados neste trabalho.

4.1.5.2. Processamento de Dados

Foi aplicada a análise *Feature-Oriented Principal Component Selection* (FPCS) e *Spectral Angle Mapping-SAM* (Kruse *et al.*, 1993). Posteriormente, foi feita a análise da influência da cobertura vegetal sobre os resultados da análise SAM, utilizando dados NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) (Rouse *et al.*, 1974).

Os métodos de processamento, foram aplicados aos dados ASTER com base nas características espectrais dos minerais-chave da alteração hidrotermal para extrair informação de interesse (Crosta *et al.*, 1989). Assim, as bandas em que os minerais-alvo são indicadores de alterações hidrotermais foram seleccionadas para a análise.

4.1.5.3. Absorção espectral de minerais de alteração

Vários trabalhos publicados mostram que a hematite e a goethite, são os principais minerais na zona oxidada, possuem absorções espectrais entre 9,9 e 1,1 μm devido à ocorrência de óxido de ferro; minerais de epidoto, clorite e calcite na zona propilítica exibem absorção a 2,35 μm devido a Mg-OH e CO₃. Os minerais caulino e alunite da zona argílica mostram menores absorções de Al-OH a 2,17 μm , os minerais ilite e sericite da zona fílica exibem absorção de Al-OH a 2,20 μm (Pour *et al.*, 2015; Hosseini et al., 2014a, b.; Rowan *et al.*, 2006; Hunt *et al.*, 1976; Clark, 1999)

4.1.5.4. Mapeamento de zonas de alteração

Para delinear as zonas de alteração associados a possíveis depósitos VMS na área de estudo, foram utilizadas as relações de banda ASTER (2/1), (4/(5+6)) e (6+9)/(7+8) para a caracterização das zonas de óxidos de ferro, zonas de alteração argílica e propilítica (Rowan *et al.*, 2003, CSIRO, 2010; Shahi *et al.*, 2014). A Figura 15 representa a imagem obtida após o processamento e relações de bandas usada na extração de alterações hidrotermais aplicadas na modelação de favorabilidade.

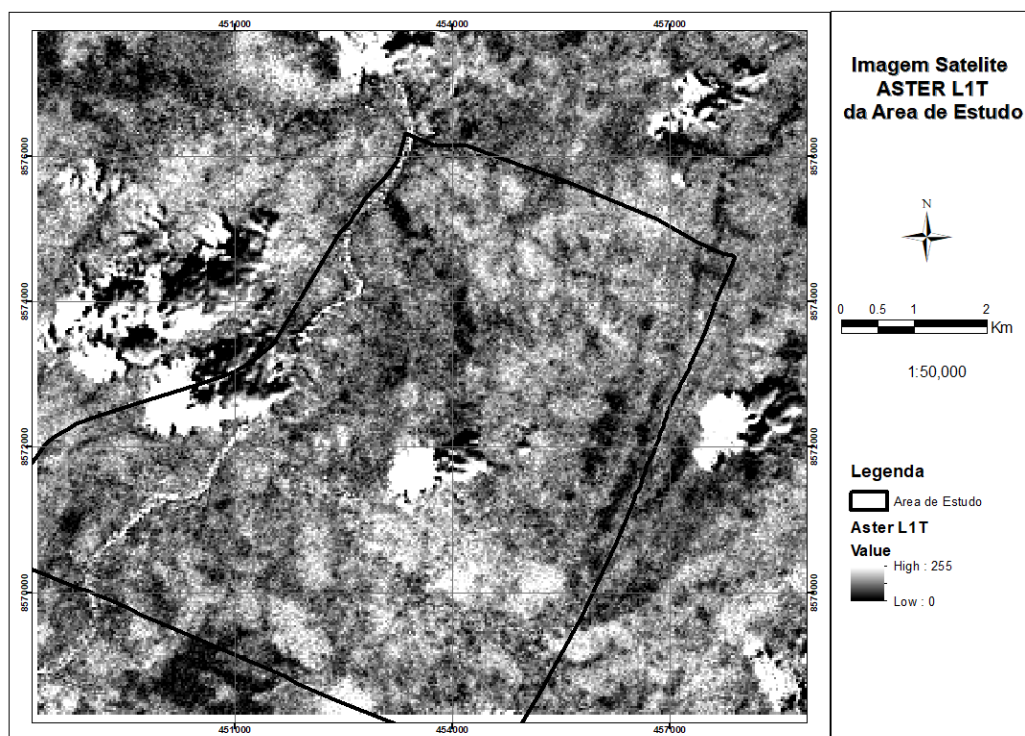


Figura 15. Imagem ASTER -L1T, processada com zonas de alteração definidas pelas relações de bandas 2/1 para óxidos de ferro, 4/ (5+6) para a alteração argílica e (6+9) / (7+8) para a alteração propilítica.

4.2. Construção da Geodatabase

O modelo de base de dados foi desenhado a partir do software ArcGIS Diagrammer da ESRI que é um software adequado para modelação de geodatabase (Dobesova, 2012).

4.2.1. Identificação de Entidades

São 6 Entidades identificados no âmbito do trabalho, nomeadamente:

- AREADEESTUDO: Representação gráfica da unidade área de estudo;
- ESTRUTURAS LINEARES: Representação gráfica de estruturas lineares com orientação;
- INTERPR GEOFIS: Feições geológicas resultantes de interpretação de dados geofísicos;
- OXIDOS DE FERRO: Representação gráfica de zonas de alteração de ferro
- ALTERACAO PROPILITICA: Representação de zonas de alteração hidrotermal propilítica.
- ALTERACAO ARGÍLICA: Representação de zonas de alteração hidrotermal argílica.
- GEOQUIMICA SOLOS: Representação gráfica de pontos de amostra de solos, a fase de investigação, número da amostra e respectivos resultados de análises químicas de Cu e Zn;
- GEOLOGIA: Representação gráfica da unidade geológica mapeada no terreno com respectivas características e códigos.

4.2.2. Identificação dos Atributos das Entidades

AREADEESTUDO (OBJECTID; Shape; Shape_Length; Shape_Area)

ESTRUTURAS_LINEARES (OBJECTID; Shape; LAYER; Type; ID_Estrut; CODIGO; Shape_Length)

INTERPR_GEOFIS (OBJECTID; Shape; LAYER; Type; DENOMINACA; Shape_Length; Shape_Area)

OXIDOS_DE_FERRO (OBJECTID; Shape; Length; Area; Alteracao; Codigo; Range; Shape_Length; Shape_Area)

ALTERACAO_PROPILITICA (OBJECTID; Shape; Length; Area; Alteracao; Codigo; Range; Shape_Length; Shape_Area)

ALTERACAO_ARGILICA (OBJECTID; Shape; Length; Area; Alteracao; Codigo; Range; Shape_Length; Shape_Area)

GEOQUIMICA_SOLOS (OBJECTID; Shape; LAYER; SampleID; Orig_North; Orig_East; Zn_Avg; Cu_Avg; Investigat; Z)

GEOLOGIA (OBJECTID; Shape; LITOLOGIA; Mapping; Type; CODIGO; Descricao; Shape_Length; Shape_Area)

4.2.3. Etapas da Construção da Geodatabase

A construção do modelo da geodatabase para a área de estudo, seguiu as etapas abaixo:

(a) Criação de um arquivo em formato geodatabase (Montepuez_GDB.mdb), contendo um (1) feature dataset (PPesquisa_Montepuez) e seis (6) feature class (AREADEESTUDO; OXIDOS_DE_FERRO; ALTERACAO_PROPILITICA; ALTERACAO_ARGILICA; ESTRUTURAS_LINEARES; INTERPR_GEOFIS; GEOQUIMICA_SOLOS; GEOLOGIA).

Seis (6) subtipos de GEOQUIMICA_SOLOS e GEOLOGIA (Result_Zn e Result_Cu e Litologia; Caracteristica; Origem; Respons_Mapea).

E quatro (4) raster datasets nomeadamente (ftg_tzz; mag_rst; vtem_0_120m; ASTER_L1T)

(b) Importação dos arquivos vectoriais (“feature class”) já relacionados contidas no arquivo Montepuez Project.mdb a partir do ArcCatalog e por fim o teste do modelo Montepuez_GDB.mdb.

4.2.4. Modelo Lógico da Geodatabase

A Figura 16 a baixo, apresenta o fluxograma do modelo de geodatabase feito em *ArcGIS Diagrammer*, contendo todos dados necessárias com os resultados e estruturas em detalhe. As *Features Datasets* são representadas a castanho, as *Feature Classes* são representadas a verde escuro e os *subtypes* a verde claro, as *Raster Datasets* a rosa e as *Raster Band* a azul.

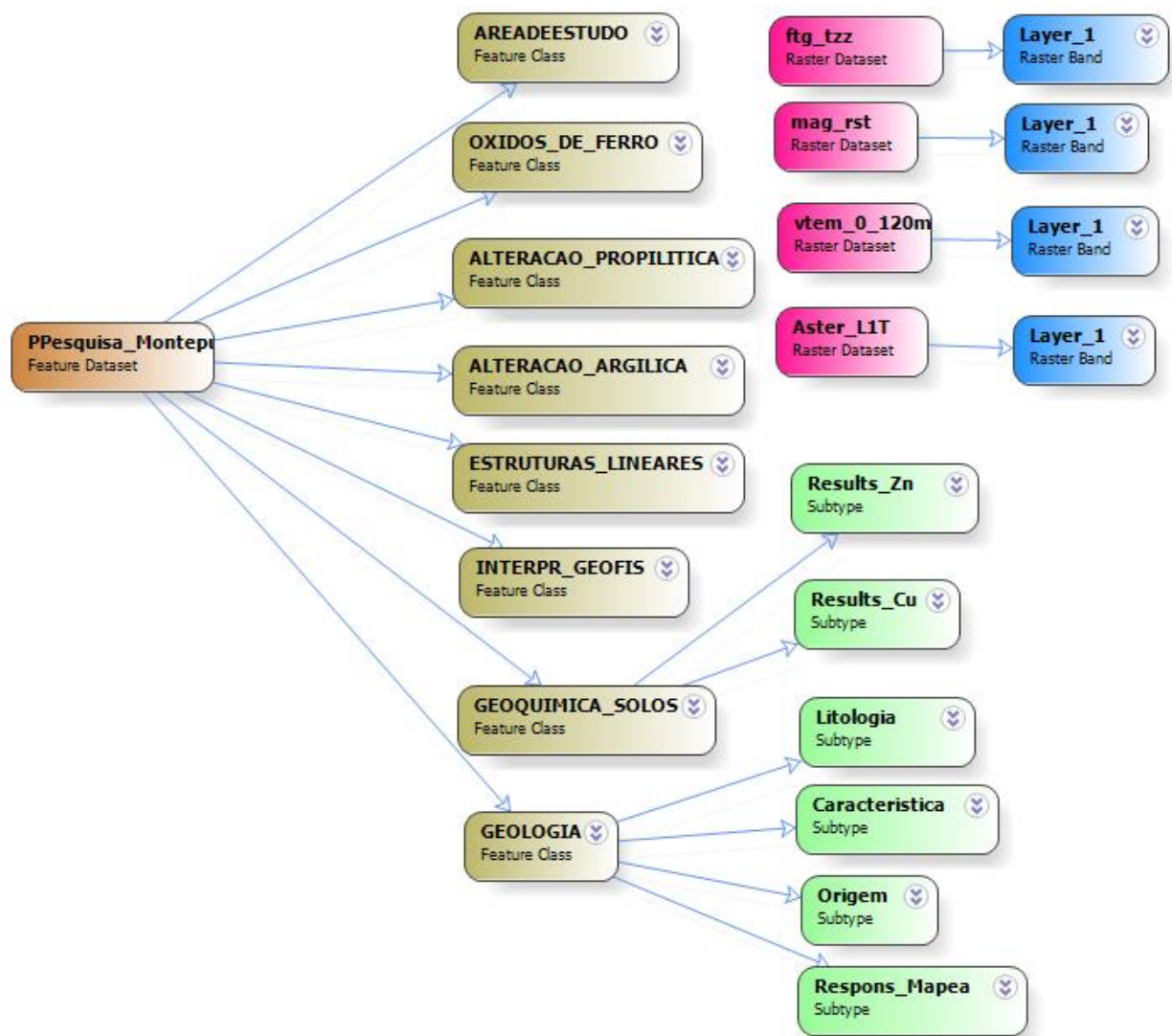


Figura 16. Modelo de base dados de prospecção e pesquisa mineira de Montepuez

4.2.5. Modelo Físico da Geodatabase

O esquema da geodatabase foi exportado do *ArcGIS Diagrammer* para o arquivo XML. O arquivo XML foi importado para uma nova geodatabase vazia no aplicativo ArcCatalog. O ArcCatalog é um gestor de dados espaciais para o software ArcGIS. Todas as estruturas geodatabase, previamente projectadas no modelo, são criadas automaticamente pela importação. A estrutura do geodatabase é mostrada na Figura 17. Dados reais foram importados para a estrutura vazia do geodatabase e abertos em ArcGIS Desktop.

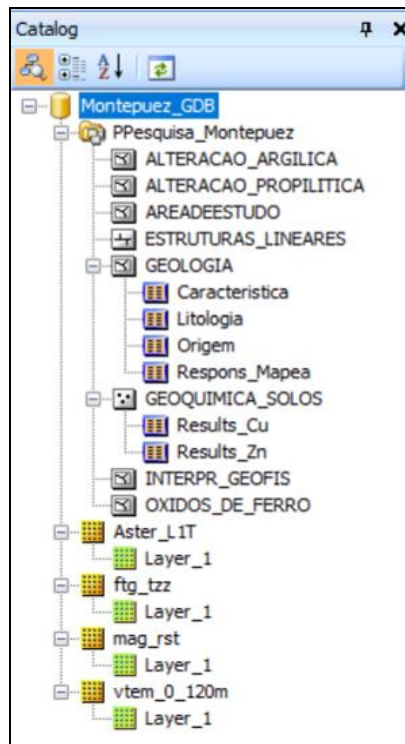


Figura 17. Estrutura da geodatabase 'Montepuez_GDB.' em ArcCatalog após a importação do ficheiro XML

4.2.6. Teste da Geodatabase

O teste do modelo de dados desenvolvido foi efectuado por execução de duas operações de análise. Para avaliar a sua capacidade de resposta, são apresentados a seguir:

- i. Seleccionar amostras correspondentes a fase de investigação de seguimento (*follow up*) e que os teores de Zinco estejam acima de 1000ppm ou teores de Cu acima de 500ppm.

```
SELECT * FROM GEOQUIMICA_SOLOS WHERE [Investigat] LIKE 'Follow Up' AND [Zn_Avg] >1000 OR [Cu_Avg] >500
```

Esta operação seleccionou no total 23 amostras que obedecem a condição.

- ii. Quais são as litologias do tipo sedimentar que foram mapeados por FLX.

```
SELECT * FROM GEOLOGIA WHERE [TYPE] LIKE 'Sedimentar' AND [Mapping] LIKE 'FLX'
```

Esta operação seleccionou apenas 1 litologia que obedece a condição.

As diferentes operações de análise feitas, permitem confirmar que o modelo implementado produz uma imagem fiável e representativa dos dados.

4.3. Operações de Modelação de Favorabilidade de Cu e Zn

As operações de modelação de favorabilidade mineral de Cu e Zn na área de estudo, foram efectuadas a partir de ferramentas do *Model Builder* do ArcGis 10.2. O modelo foi desenhado considerando os valores reclassificados, pontuação dos atributos e a influência de cada factor analisado em escala de adequação comum e os resultados foram integrados por sobreposição ponderada para produzir o mapa de favorabilidade.

4.3.1. Critérios de Favorabilidade e Justificação da Atribuição da Influência

Os valores atribuídos aos parâmetros prospectivos de favorabilidade foram identificados e medidos com base na pesquisa bibliográfica e as opiniões dos especialistas sobre o contexto local. No anexo B é apresentado o modelo de questionário aplicado que foi enviado por email a 4 especialistas. A atribuição de pesos de influência obedeceu critérios de favorabilidade de minerais de Cu e Zn em depósitos do tipo VMS:

Litologia: Pohl (2011) interpreta a unidade quartzo feldspática micácea como sendo exalativo silicificado que servem de capa para as mineralizações do sistema VMS na área de estudo e referiu o fato de que a sequência está agora invertida. Arthurs (2012) concorda com este argumento. Esta unidade apresenta níveis de alteração diversificado. Neste contexto a presença de chapéus de ferro e quartzo feldspático micáceo com/sem pirite, pode indicar a proximidade de mineralizações de Cu e Zn tornando relevante a influência unidade litológica no modelo. A influência da litologia foi atribuída 10%.

Geoquímica de Cu e Zn: Anomalias positivas de Cu e Zn ocorrendo em associação com solos, tornam a geoquímica de Cu e Zn factores importantes no modelo. Porém, deve-se ter em conta o factor contaminação. O tipo de rocha, influência na alimentação dos componentes de solos, consequentemente nos teores químicos das amostras. A geoquímica de solos sobretudo de Cu, em sobreposição com a litologia e VTEM foram muito aplicados na alocação de furos de sondagem na área de estudo. Foi atribuída 25% a influência de geoquímica de Cu e 10% a geoquímica de Zn no modelo. O Zn tem maior índice de mobilidade em relação a Cu em solos na área de estudo.

VTEM: Um estudo em depósitos de Cu e Zn, em Rio do Peixe no Brazil, concluiu que os condutores definidos por VTEM associavam-se à sulfuretos. Maior parte de furos

feitos sobre estes condutores tinham chance de interceptar sulfuretos associados à mineralizações de Cu/Zn, mesmo sem estar relacionado com anomalias magnéticas (Fruchting *et al.*, 2009). Na área de estudo, anomalias de maior condutância nem sempre apresentam melhores resultados, devido a associação com a pirrotita e subordinadamente a calcopirita ou alguns casos a grafite. A influência de VTEM é 20%.

FTG Tzz: Estudos gravimétricos em alvos com furos de sondagem efectuados, mostram associação de furos positivos com anomalias gravimétricas intermédias a altas, é o caso do depósito VMS de Skellefte na Suécia (Carranza *et al.*, 2010). Esta informação é justificada pelo facto dos depósitos VMS estarem associadas a rochas félsicas vulcânicas com composição quartzo feldspática. Algumas anomalias elevadas podem estar associadas a intrusões máficas. A influência de FTG Tzz foi de 5%.

Magnetometria RTP: A intensidade magnetica total intermédia a alta tem sido associada aos principais alvos de sondagem que intersectaram mineralizações de Cu e Zn na área de estudo. Esta relação é também discutida por Carranza *et al.*, (2010) no estudo sobre mapeamento preditivo de favorabilidade e estimativa de depósitos VMS de Skellefte na Suécia. No entanto, 4% foi a influência atribuída a esta variável.

Estruturas Lineares: Falhas, zonas de cinzalhamento ou fracturas referenciados neste trabalho como estruturas lineares são possivelmente controladores de mineralizações em depósitos VMS (Willdén, 1986; Vivallo *et al.*, 1988; Allen *et al.*, 1996). A influência de estruturas lineares no modelo de favorabilidade foi considerada 5%. Levantamento geofísico terrestre e modelação dos mesmos dados são importantes para aumento do nível de detalhe das estruturas lineares associadas com mineralização.

Alteração Hidrotermal: Soluções hidrotermais quentes interagem com a rocha encaixante e alteram a composição mineral a distâncias consideráveis. Foi observado em sondagem que a alteração propílitica antecede a principal zona de mineralização formando zona marcante. Os chapéus de ferro, foram importantes na alocação de furos de sondagem. Estes sobrepõem-se principalmente à zona propílitica e óxidos de ferro. Para alteração propílitica e óxidos de ferro foi atribuída 8% de influência e argílica 5%.

4.3.2. Pontuação dos Atributos das Variáveis

A escala de pontuação padrão dos atributos das variáveis estudadas foi de 1 a 9 em incrementos de 1. Esta escala representa o nível de importância que cada atributo apresenta dentro da variável analisada. O atributo menos cotado tem a pontuação mínima que é 1 e o mais importante tem a pontuação máxima 9.

4.3.3. Reclassificação dos Atributos

Devido à diferença dos valores da pontuação em diversos atributos, antes que as múltiplas variáveis possam ser combinadas para análise, cada um deve ser reclassificado ou transformado numa escala de proporção comum (ESRI, 2019). No entanto, foi feita a reclassificação de todos atributos a partir da ferramenta reclassificar, sendo que as pontuações mais baixas (1-4) correspondem a menor favorabilidade de ocorrência de mineralizações de Cu e Zn e são reclassificados com o número 1. As pontuações dos moderadas (5-7), correspondem a favorabilidade moderada e são reclassificados com o número 2 e para as pontuações entre (8-9), correspondem a maior favorabilidade de ocorrência de Cu e Zn e são reclassificados pelo número 3 (ver tabela 2 e 3).

A reclassificação dos atributos das variáveis analisadas, baseou se nos critérios atribuídos por especialistas de prospecção e pesquisa na área de estudo.

Tabela 2 Reclassificação dos intervalos de pontuação dos principais atributos

Intervalo de Pontuação do Atributo	Reclassificação	Favorabilidade
1 – 4	1	Menor
5 – 7	2	Moderada
8 - 9	3	Maior

A tabela 3, é o resumo dos critérios e atributos de favorabilidade aplicadas com a respectiva pontuação, reclassificação e influência no modelo de favorabilidade.

Tabela 3 Critérios de favorabilidade e respectivos pesos de influência de Cu e Zn. Atributos das variáveis com a pontuação relativa e sua reclassificação em níveis de favorabilidades.

Critério/ Variável	Atributo	Pontos	Reclassifi- cação	Favorabi- lidade	Influência %
Geoquímica Cu (ppm)	00.00-53.84	4	1	Menor	25
	53.85- 75.00	5	2	Moderada	
	75.00-171.22	8	3	Maior	
	171.23-228.30	8	3	Maior	
	228.31-285.37	8	3	Maior	
	285.38-342.45	9	3	Maior	
	342.46-399.52	9	3	Maior	
VTEM (BGR)	0.00 - 141	1	1	Menor	20
	141 - 198	5	2	Moderada	
	198 - 255	9	3	Maior	
Litologia	Quartzo Feldspático (recristalizado)	7	2	Maior	10
	Quartzo Feldspático Micáceo com/ sem pirite	9	3	Moderada	
	Piroxenito	2	1	Menor	
	Granulito Máfico	4	1	Menor	
	Granulito Intermédio	4	1	Moderada	
	Gabbro	2	1	Menor	
	BMF	2	1	Menor	
	Xisto Grafitoso	1	1	Menor	
Geoquímica Zn (ppm)	1.08-45.32	3	1	Menor	10
	45.33-82.75	4	1	Menor	
	82.76-137.19	5	2	Moderada	
	137.20-218.86	7	2	Moderada	
	218.87-341.36	8	3	Maior	
	341.37-538.72	8	3	Maior	
	538.73-868.79	9	3	Maior	
Alteração Propilitica (dist. Infl. em 'm')	0 - 100m	9	3	Maior	8
	100-200m	7	2	Moderada	
	200-300m	3	1	Menor	
Óxidos de Ferro (dist. Infl. em 'm')	0 - 100m	9	3	Maior	8
	100-200m	7	2	Moderada	
	200-300m	3	1	Menor	
Alteração Argilica (dist. Infl. em 'm')	0 - 100m	9	3	Maior	5
	100-200m	7	2	Moderada	
	200-300m	3	1	Menor	
Estruturas Lineares (dist. Infl. em 'm')	0 - 150m	9	3	Maior	5
	150-300m	6	2	Moderada	
	300-450m	1	1	Menor	
Grav. FTG (BGR)	0.00 - 141	1	1	Menor	5
	141 - 198	5	2	Moderada	
	198 - 255	9	3	Maior	
Mag_RTP (BGR)	0.00 - 141	1	1	Menor	4
	141 - 198	5	2	Moderada	
	198 - 255	9	3	Maior	
Total					100

4.3.4. Fluxograma de Modelação da Favorabilidade de Cu e Zn

O fluxograma do modelo elaborado desde a entrada inicial dos dados até a sobreposição ponderada (*Weighted Overlay*), é mostrado na Figura 18. São no total 10 variáveis analisados e que influenciam de certa forma na ocorrência de mineralizações de Cu e Zn nomeadamente: FTG Tzz, VTEM, magnetometria RTP, alteração argílica, propilítica e óxidos de ferro, litologia, estruturas lineares, geoquímica de Cu e geoquímica de Zn. Dentre os factores atrás mencionados, a litologia, a geoquímica de solos e geofísica VTEM foram consideradas como tendo a informação espacial com a maior influência percentual no modelo.

As principais ferramentas de geoprocessamento usadas foram: recortar (*Clip*), *Multiple ring buffer*, *make feature layer*, *kriging*, *feature to raster*, *reclassify* e *weighted overlay*,

- (i) Recortar /*Clip*: foi aplicado na delimitação da área de estudo dos diversos mapas vectoriais analisados (não importando se são pontos, linhas ou polígonos)
- (ii) *Multiple ring buffer*: foi aplicada para criar camadas vectoriais de polígonos, gerados como zonas de influência em torno das geometrias dos elementos vectoriais de para as alterações hidrotermais e estruturas lineares.
- (iii) *Make feature layer*: foi aplicado para criar camadas de dados geoquímicos de Cu e Zn.
- (iv) Krigagem /(*Kriging*): apos a aplicação da ferramenta *Make feature layer*, a krigagem foi usada especificamente para interpolação de conjunto de dados de pontos de geoquímica de Cu e Zn.
- (v) Recurso para raster (*Feature to raster*): aplicado para converter um conjunto de dados de recursos em um conjunto de dados raster.
- (vi) Reclassificação/ (*Reclassify*): usado para reclassificar valores das classes em um conjunto de dados raster.
- (vii) Sobreposição ponderada/ (*Weighted Overlay*): foi usado para sobreposição de todas variáveis rasters analisados usando uma escala comum e ponderando cada de acordo com a sua importância/ influência.

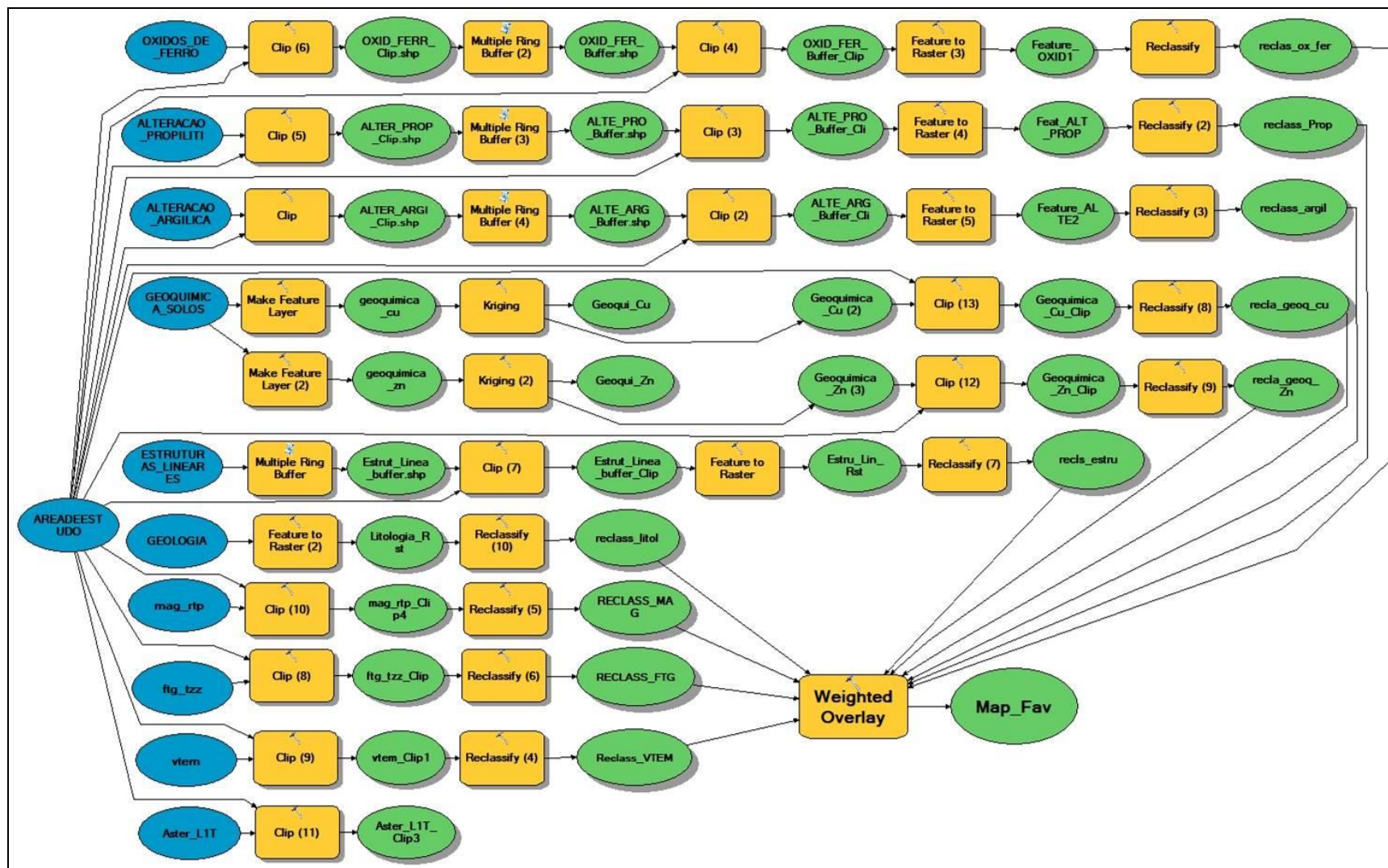


Figura 18. Fluxograma do modelo aplicado na determinação de áreas favoráveis a ocorrência de Cu e Zn.

4.3.5. Produção do Mapa Final de Favorabilidade e Teste do Modelo

Segundo Buttinelli *et al.*, (2013), as funções de Sobreposição Ponderada (*Weighted Overlay*) representam uma das abordagens mais utilizadas para resolver correlações espaciais multicritério em ambientes SIG, tais como selecção de locais e modelos de adequação para avaliações de recursos. No entanto, a produção do mapa final que corresponde o modelo de adequação de mineralizações de Cu e Zn foi um dos objectivos principais do trabalho.

Após a reclassificação de todos os mapas prospectivos, foi aplicada a ferramenta sobreposição ponderada com a integração de todas as variáveis por forma a produzir se um mapa final com a representação dos três principais níveis de favorabilidade (menor, moderada e maior).

Na sobreposição ponderada, as influências que foram atribuídos aos dados de entrada, o seu somatório foi de 100%. Os factores mais favoráveis resultaram em valores mais altos na saída *raster*, identificando, portanto, esses locais como os melhores.

O teste do modelo final foi feito com o objectivo principal de provar a sensibilidade do modelo de favorabilidade mineral de cobre e zinco criado. Segundo Al-Mashreki *et al.*, (2011), os principais testes de sensibilidade mais utilizadas são baseadas na variação da ponderação das variáveis que estão implicados no processo para testar se modifica significativamente os resultados obtidos.

Nwer (2005), indica que o propósito principal do teste de sensibilidade para as variáveis de favorabilidade, é descobrir a influência dos diferentes pesos atribuídos a essas variáveis. É importante observar como os resultados serão alterados se os pesos forem alterados.

No entanto, o teste do modelo de favorabilidade para o presente trabalho, consistiu na criação de mapas com diferente ponderação para as variáveis por forma a observar a possível variação dos alvos de favorabilidade. No total, foram trinta esquemas com pesos de influência diferentes que foram construídos a partir do modelo (ANEXO E).

Os resultados foram comparados para investigar a influência de cada variável sobre a favorabilidade no geral. A avaliação visual dos níveis de favorabilidade e cálculo da área percentual dos mesmos níveis foram realizadas para interpretar o resultado da análise de sensibilidade. Ao comparar a área percentual dos níveis de aptidão para o esquema de ponderação, a sensibilidade das variáveis de favorabilidade pode ser avaliada (Al-Mashreki *et al.*, 2011). A Tabelas 4 e 5, mostram as ponderações atribuídas aos modelos de teste a análise de sensibilidade. Para cada variável, três esquemas de ponderação diferentes (1%, 28% e 64%) foram atribuídos e para todas as ponderações das variáveis remanescentes receberam valores iguais.

Tabela 4 Ponderação atribuída aos modelos de teste para a análise de sensibilidade (adaptado de Al-Mashreki *et al.*, 2011).

Variáveis	Modelos														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Geoquímica Cu (%)	1	28	64	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
VTEM (%)	11	8	4	1	28	64	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Litologia (%)	11	8	4	11	8	4	1	28	64	11	8	4	11	8	4
Geoquímica Zn (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	1	28	64	11	8	4
Alteração Propilitica (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	1	28	64
Óxidos de Ferro (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Alteração Argilica (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Estruturas Lineares (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Mag_RTP (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Grav. FTG (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Tabela 5 (Continuação) Ponderação atribuída aos modelos de teste para a análise de sensibilidade (adaptado de Al-Mashreki *et al.*, 2011).

Variáveis	Modelos														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Geoquímica Cu (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
VTEM (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Litologia (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Geoquímica Zn (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Alteração Propilitica (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Óxidos de Ferro (%)	1	28	64	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Alteração Argilica (%)	11	8	4	1	28	64	11	8	4	11	8	4	11	8	4
Estruturas Lineares (%)	11	8	4	11	8	4	1	28	64	11	8	4	11	8	4
Mag_RTP (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	1	28	64	11	8	4
Grav. FTG (%)	11	8	4	11	8	4	11	8	4	11	8	4	1	28	64
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Aqui são apresentados resultados do uso da análise multicritério para a criação de mapas de favorabilidade mineral de Cu e Zn, a partir de análise de dados de litologia, geoquímica de solos, geofísica, alterações hidrotermais e estruturas lineares.

5.1.Extracção de Zonas de Alteração Hidrotermais

Zonas de alteração hidrotermal que foram aplicadas na modelação de favorabilidade de Cu e Zn. Foram obtidas a partir do processamento de dados de imagem satélite ASTER L1T e tendo em consideração as relações entre bandas $(6+9) / (7+8)$ para alteração propílica, $(4 / (5+6))$ para extracção de alteração argílica e $(2/1)$ para óxidos de ferro.

5.1.1. Alteração Propílica

A zona de alteração propílica é mais desenvolvida na faixa Oriental e Central da área de estudo (Figura 19). Como pode-se ver na mesma imagem que as principais zonas de alteração tendem a distribuir-se sob forma circular zonal. Os Principais minerais de alteração da zona propílica na área de estudo são principalmente clorite, seguido por epídoto e carbonatos. Os resultados de mapeamento usando a relação $(6+9) / (7+8)$ das bandas ASTER SWIR reflectem a distribuição espacial da clorite, epídoto e carbonatos que são os principais minerais da zona propílica na área de estudo.

Foram definidas áreas de influência a 100, 200 e 300m de distância para as principais zonas de alteração propílica, sendo a Figura 20, o mapa resultante. Neste mapa áreas delineadas a vermelho que representam zonas até 100m, tem mais chances de hospedar vários tipos de mineralizações que podem ou não ser acompanhados por mineralização cobre e zinco com diferentes concentrações. Áreas de influência delineada em azul corresponde a zona mais distal, classificada com menor chance que presença de mineralizações.

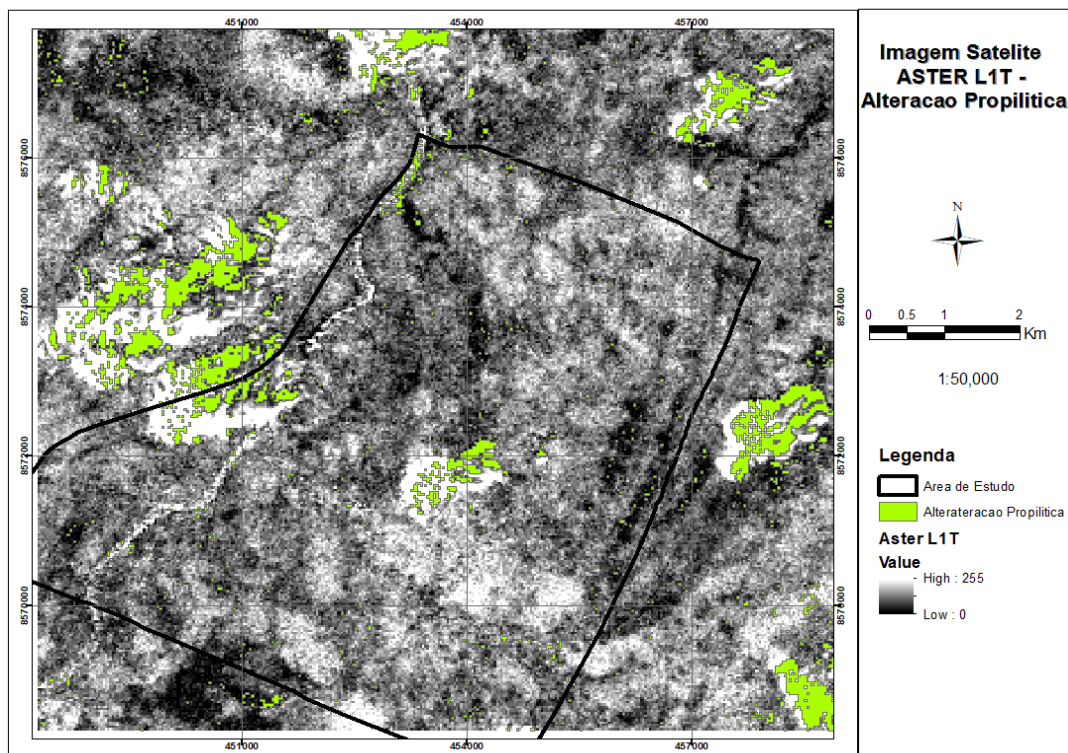


Figura 19. Imagem ASTER -L1T, processada e com zonas de alteração hidrotermal definidas pelas relações de bandas $(6+9) / (7+8)$ para a alteração propílica.

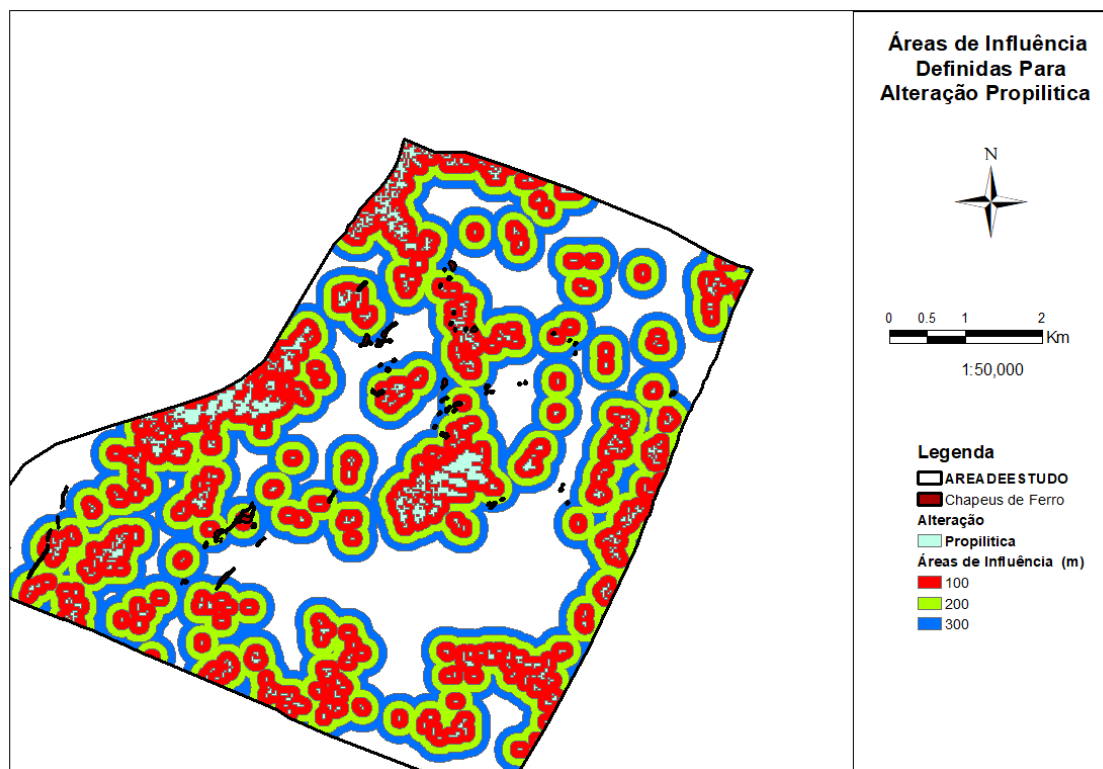


Figura 20. Áreas de influência definidas para alteração propílica a distância de 100, 200 e 300m

5.1.2. Alteração Argílica

As zonas de alteração argílica estão mais desenvolvidas na faixa Oriental da área de estudo, aparecendo também na parte Leste algumas faixas descontínuas (Figura 21). Esta alteração é menos desenvolvida na parte Central, sendo que mais ao Norte é quase inexistente. Ainda na parte Central, pode-se observar que a alteração argílica aparece nas margens da alteração propílica (manchas brancas na imagem ASTER processada do fundo) o que de certa forma pode correlacionar as duas alterações.

Segundo Grove *et al.*, (1992) e Vicente *et al.*, (2011), os minerais argilosos apresentam alta reflectância na banda 4 e alta absorção nas bandas 5 e 6. Portanto, a identificação da alteração argílica foi a partir da relação de bandas $B4 / (B5 + B6)$.

A alteração argílica segue uma estrutura linear que coincide com a principal orientação SW-NE das estruturas lineares analisadas no trabalho.

Os minerais mais característicos da zona de argila no modelo de depósito de alteração hidrotermal são o quartzo, a caulinita e a montmorilonite (Lowell *et al.*, 1970). A existência destas alterações é uma das chaves importante para a exploração de depósitos em análise, principalmente, com métodos de detecção remota.

Para camadas representando alteração argílicas finais, foram definidas áreas de influência a distâncias de 100, 200 e 300m. A Figura 22, ilustra o mapa resultante. Considera-se a distância de 100m como tendo a maior probabilidade de mineralizações relacionadas com a alteração argílica na área de estudo podendo ser ou não de cobre e zinco.

A sobreposição das áreas representando a alteração argílica com os chapéus de ferro (*gossans*) mapeados na superfície (Figura 22), indica maior frequência dos chapéus de ferro na área de influência de 300m. Alguns pontos aleatórios aparecem aos 200m. Isto pode implicar que os chapéus de ferro que representam alterações de sulfuretos na superfície não tenham correlação com alterações argílicas.

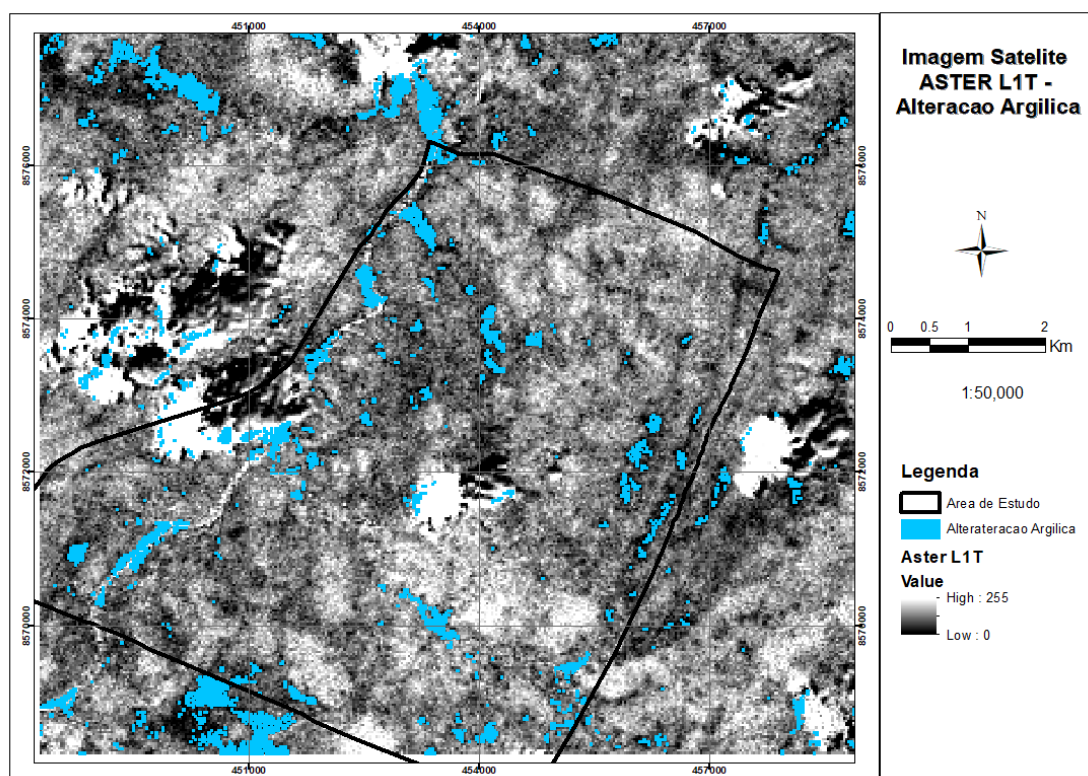


Figura 21. Imagem ASTER -L1T, processada e com zonas de alteração hidrotermal definidas pelas relações de bandas 4/ (5+6) para a alteração argílica.

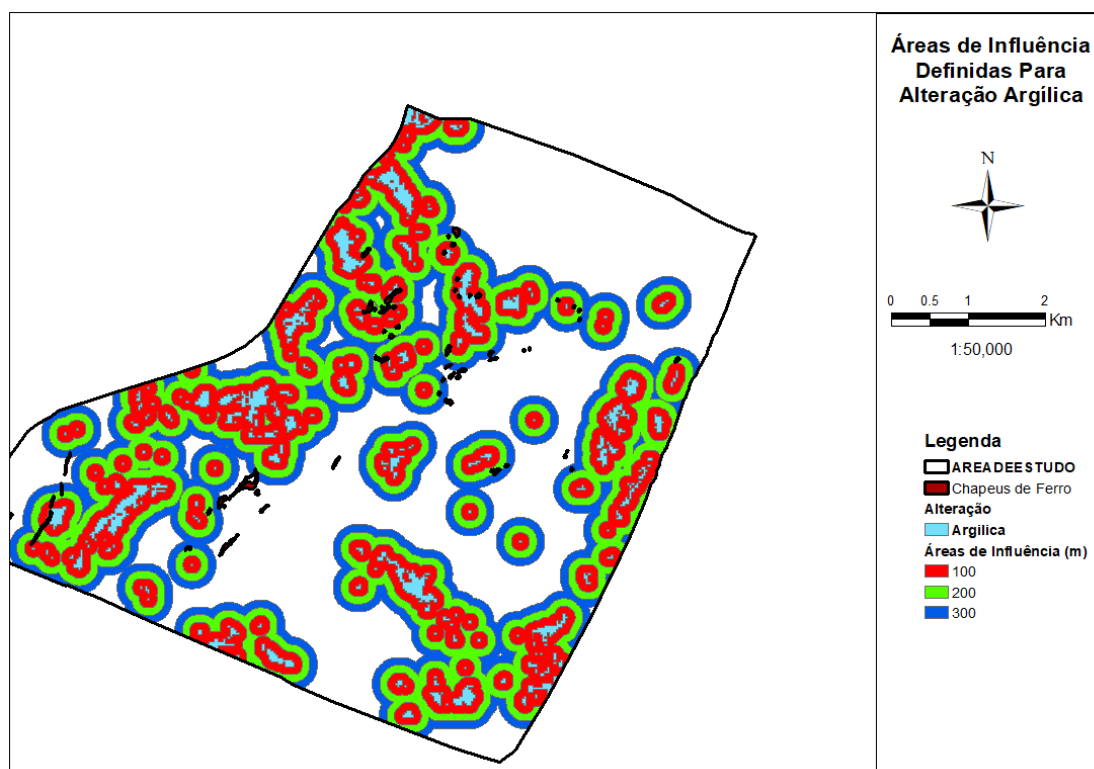


Figura 22. Áreas de influência definidas para alteração argílica a distância de 100, 200 e 300m

5.1.3. Óxidos de Ferro

A Figura 23, é o resultado do mapeamento através da relação B2 / B1 de ASTER referente a área de estudo. Rowan *et al.*, 2003 e Duuring *et al.*, 2012, utilizaram a relação B2 / B1 do ASTER para mapear a abundância mineral do ferro ferroso devido à intensa absorção de Fe^{3+} .

Óxidos de ferro estão mais representados em toda área de estudo comparativamente a alteração propílica e argílica, com uma ligeira diminuição na parte Central Sul. Assim como foi observado na imagem ASTER processada com a sobreposição da alteração argílica (Figura 21), onde esta aparece nas margens esbranquiçadas que representam alteração propílica, o mesmo comportamento pode ser observado com óxidos de ferro aparecendo principalmente nas margens da alteração propílica.

Para o mapa de óxidos de ferro, foram definidas áreas de influência a 100, 200 e 300m de distância (Figura 24).

Ainda no mapa da Figura 24, pode se observar áreas compostas por chapéus de ferro ou capa de lixiviação que constituem uma camada de alteração de sulfuretos na superfície que é útil na exploração (Sabins, 1999). Existe uma boa correlação dos chapéus de ferro (*gossans*) mapeados com as áreas extraídas de óxidos de ferro na área de estudo.

Os chapéus de ferro desempenharam papel importante na decisão de alocação de alguns furos de sondagem e trincheiras feitas na área de estudo e estes foram na sua maioria acompanhados de altos valores de geoquímica de solos tanto para o Cu assim como Zn.

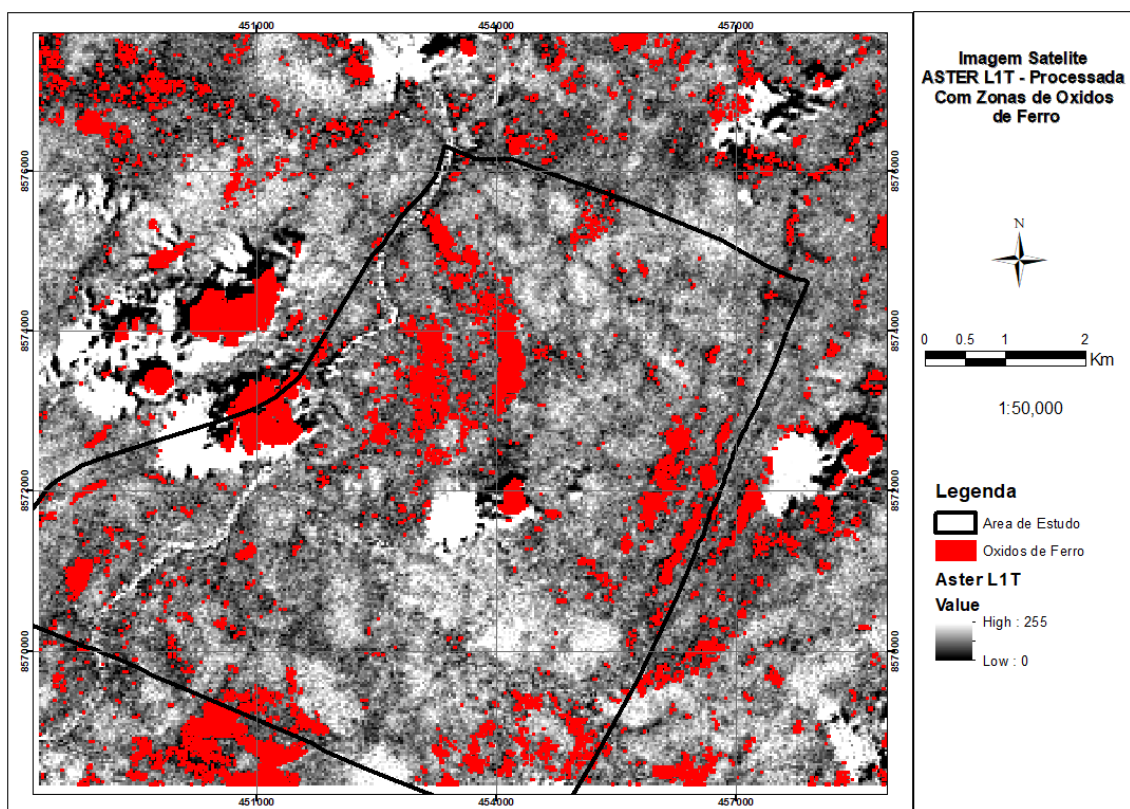


Figura 23. Imagem ASTER -L1T, processada e com zonas de alteração hidrotermal definidas pelas relações de bandas 2/1 para óxidos de ferro

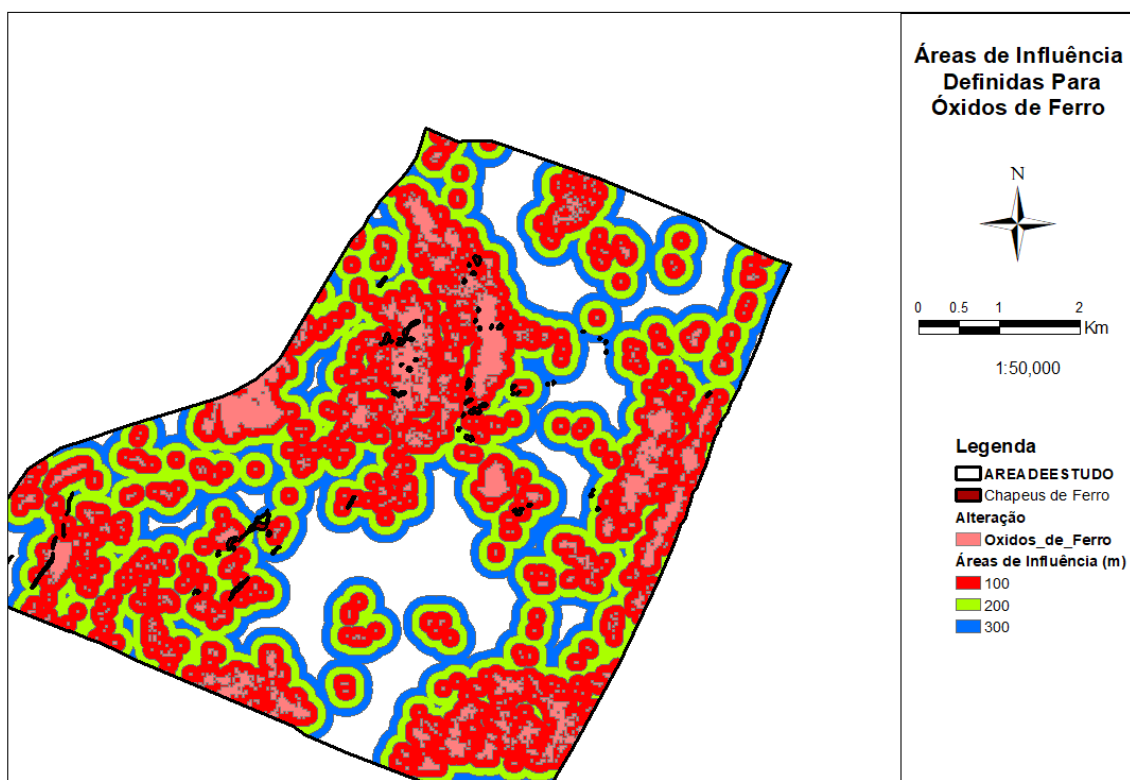


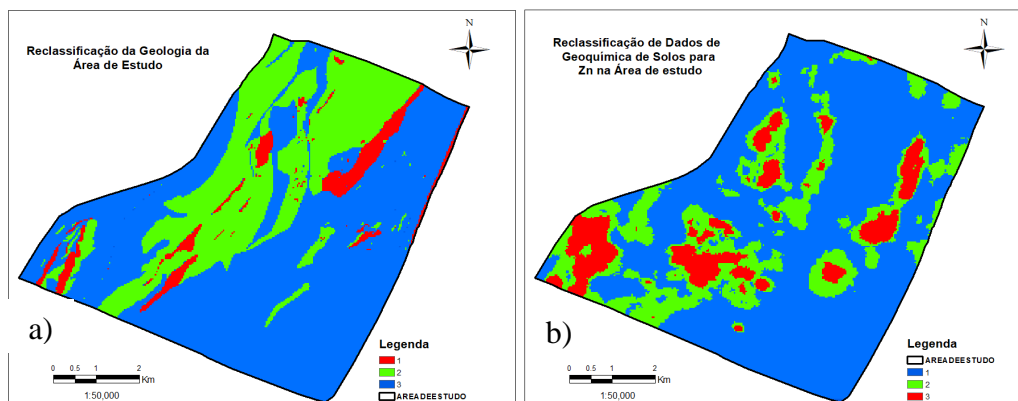
Figura 24. Áreas de influência definidas por óxidos de ferro a distância de 100, 200 e 300m

5.2. Resultados da Reclassificação

A reclassificação é útil quando se pretende substituir valores *raster* de entrada por novos valores. Por exemplo, pode se agrupar vários tipos de litologias em uma classe de litologia (ESRI, 2019).

A Figura 25 representa a reclassificação feita para todas as variáveis analisadas no modelo de favorabilidade nomeadamente: a) reclassificação da geologia para unidades litológicas, b) reclassificação da geoquímica de Zn, c) reclassificação da geoquímica de Cu, d) reclassificação de áreas de influência das distancias de estruturas lineares, e) reclassificação de dados magnetométricos RPT, f) reclassificação de dados electromagnéticos VTEM, g) reclassificação de dados gravimétricos FTG_Tzz, h) reclassificação de áreas de influência de distancias da alteração argílica, i) reclassificação de áreas de influência de distancias de alteração propílitica e j) reclassificação de áreas de influência de distancias de óxidos de ferro.

A substituição de valores *raster* correspondentes aos atributos das variáveis analisadas em três novas classes de favorabilidade nomeadamente classe 1, classe 2 e classe 3, foi efectuada por forma a agrupar determinados grupos de valores juntos. Para cada variável analisada constam as três novas classes e estão representadas em vermelho (classe 1), que representa a maior favorabilidade de mineralização de Cu e Zn. O verde (classe 2), que representa a favorabilidade moderada de presença de mineralizações de Cu e Zn e a cor azul (classe 3), corresponde a área com menor favorabilidade de ocorrência de mineralizações de Cu e Zn.



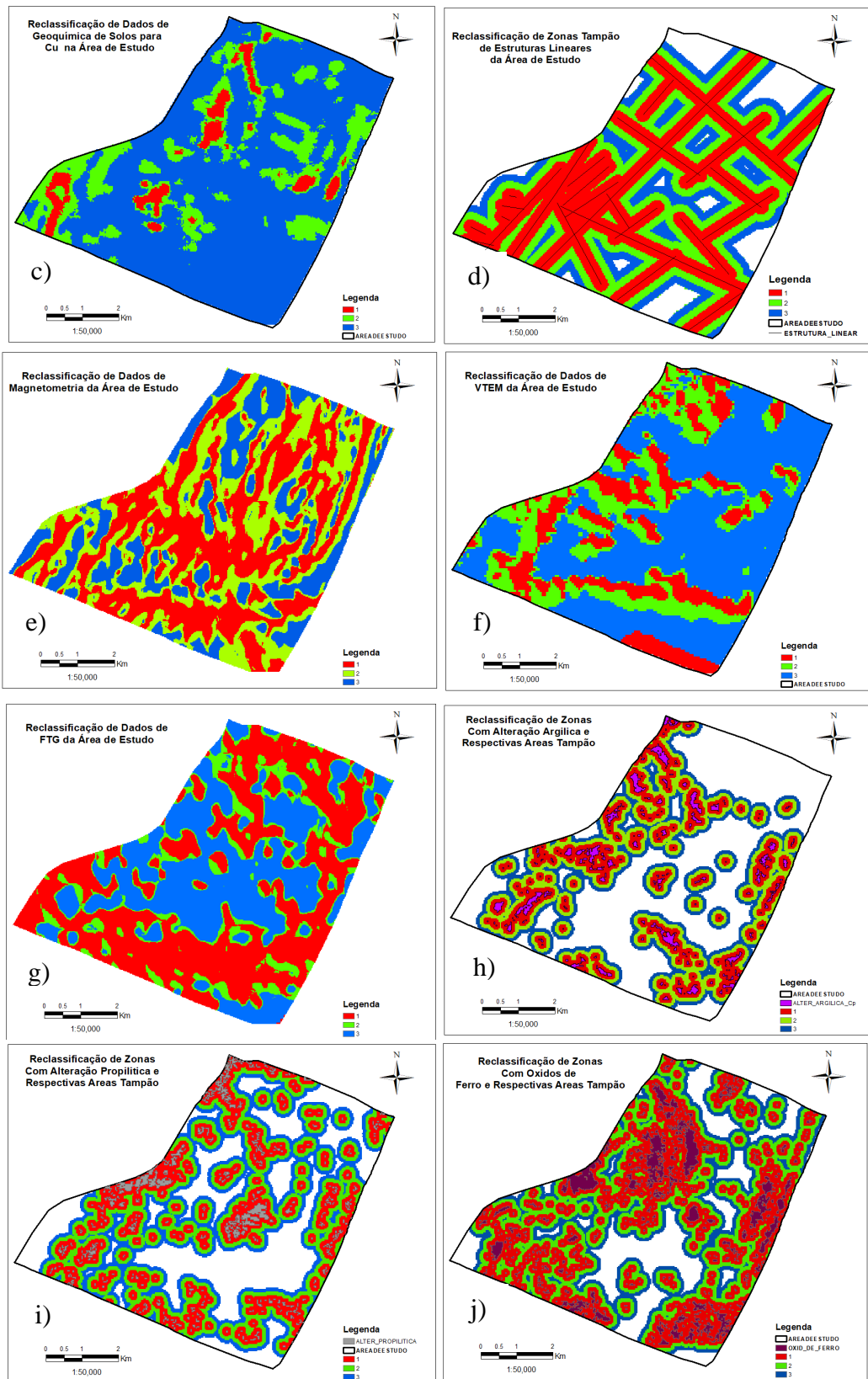


Figura 25. Reclassificação dos atributos das variáveis analisadas no modelo de favorabilidade para a área de estudo. a) Litologias, b) Geoquímica de Zn, c) Geoquímica de Cu, d) Estruturas lineares, e) Mag_RPT, f) VTEM, g) FTG_Tzz, h) Alteração argílica, i) Alteração propilítica e j) Óxidos de ferro.

5.3.Mapa Final de Favorabilidade

Os pesos foram atribuídos a vários factores influentes na previsão de áreas de favorabilidade de Cobre e zinco. Os resultados são mostrados no mapa da Figura 26. A partir deste mapa, a área com classificação 3, mostrada em azul, têm baixa favorabilidade, o que pode de certa forma não ser prioritário para as actividades de exploração de Cu e Zn na área de estudo.

Áreas com valor de classificação 2, são áreas mapeadas com favorabilidade moderada. São mostradas no mapa com a cor verde e estas podem requerer mais trabalho de prospecção e pesquisa de detalhe, pois, pode se encontrar ainda depósitos viáveis de Cu e Zn. Representam cerca de 13.55 km² da área total de estudo e encontram-se representados de forma aleatória em quase toda a área de estudo, com mais frequência na faixa oriental e menos frequência na faixa central - Sul e central – Este. Mais para o Norte da área de estudo é quase inexistente. Os polígonos que representam as áreas de favorabilidade moderada definem uma orientação preferencial SW – NE que coincide com a orientação regional das principais unidades geológicas e estruturais.

A área com classificação 1, mostrada a cor vermelha, é a principal área com maior favorabilidade de cobre e zinco na área de estudo. Representa cerca de 0.55 km² de toda a área de estudo e distribuem-se de forma aleatória mais na faixa oriental numa tendência SW-NE. Um alvo isolado de maior favorabilidade, pode ser observada a NE e este faz parte dos cinco (5) alvos com maior extensão no grupo que representa favorabilidade maior. Estas áreas, são de maior prioridade para trabalhos de prospecção e pesquisa de cobre e zinco.

O mapa de favorabilidade final fornece mais informações espaciais sobre a ocorrência de cobre e zinco dentro da área de estudo. Isso ajudaria as actividades de prospecção e pesquisa em direccionar seus objectivos de investigação dentro da área a um custo reduzido de maneira efectiva e eficiente. O mesmo mapa de favorabilidade também permitiria o gerenciamento de programas de construção de infra-estruturas diversas, visualizando a extensão das áreas prioritárias em relação à áreas de construção de estradas, escritórios, instalação da futura planta de processamento entre outras.

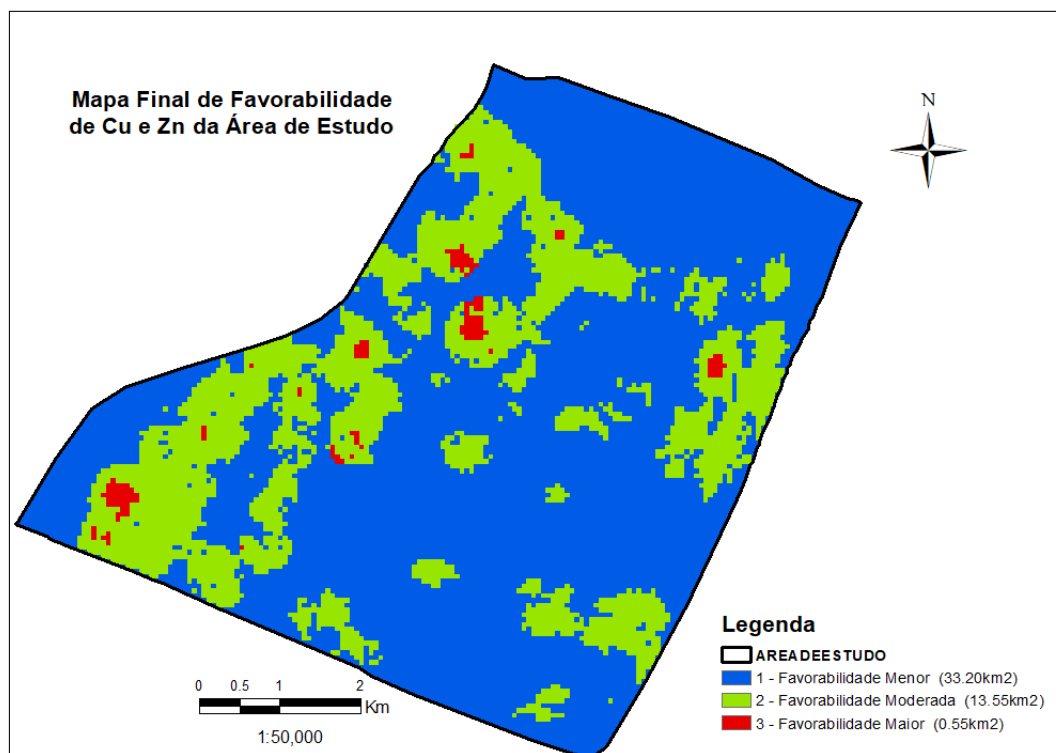


Figura 26. Mapa final com áreas favoráveis a ocorrência de mineralizações de Cu e Zn.

5.4. Teste do Modelo de Favorabilidade

A Tabela 6, mostra o resultado do teste feito para o modelo de favorabilidade de Cu e Zn da área de estudo através de atribuição de ponderação diferente (1%, 28% e 64%) para as variáveis em análise. A forma da atribuição da ponderação obedeceu à Tabela 4. Os resultados apresentados aparecem em forma de área total (Km²) para cada nível de favorabilidade resultante de cada ponderação. Os valores percentuais destes resultados, são apresentados na Tabela 7.

A Figura 27. a) até j), é a representação em gráfico de barras dos resultados da análise de sensibilidade de todas as variáveis do modelo (baseados nas tabelas 4, 5, 6 e 7).

A Figura 27 a), mostra a análise da sensibilidade da variável geoquímica de cobre baseado em vários valores de ponderação. Esta análise revela que a geoquímica de cobre é muito sensível na classificação de favorabilidade da área de estudo. Quanto mais aumenta a ponderação, os níveis de favorabilidade vão alterando. Quando a ponderação da geoquímica de cobre é de 1%, a maior favorabilidade corresponde a 0.6% da área total, a favorabilidade moderada a 36.4% e a menor favorabilidade a 63%. No entanto, no caso em que a ponderação aumenta para 64%, verifica-se que a área de maior favorabilidade também aumenta para 7.6%. A área de favorabilidade moderada diminui para 10.6% e a de menor favorabilidade aumenta para 81.8%. Isto implica que o aumento na ponderação da geoquímica de cobre tem um grande efeito sobre o padrão de favorabilidade na área de estudo. Quando há um aumento nas ponderações de geoquímica de cobre, existe uma alta possibilidade para o surgimento de maiores níveis de favorabilidade na área de estudo. Esta suposição, conclui que o factor ‘geoquímica de cobre’ tenha ponderação adequada, o que possivelmente reflecte a sua importância para a favorabilidade na área de estudo.

As variáveis VTEM, geoquímica de Zn, alteração propílica, óxidos de ferro, alteração argílica, estruturas lineares, a magnetometria e gravimetria, têm uma tendência similar a da geoquímica de cobre anteriormente descrita. São todas elas variáveis sensíveis no modelo de favorabilidade da área de estudo, caracterizadas pela alteração dos níveis de favorabilidade quando se aumenta a percentagem de ponderação.

Em relação à variável litologia (Figura 27 c)), pode-se observar uma maior variação das áreas de favorabilidade menor e moderada quando se aumenta a ponderação, mas as áreas de maior favorabilidade tendem a ser constantes com o aumento ou diminuição da ponderação. Isto implica que o factor litologia não é muito sensível para o nível de aptidão de maior favorabilidade quando se altera a ponderação.

Um aspecto observado nos gráficos analisados é que há duas tendências no comportamento das variáveis, aquando do aumento da ponderação. A primeira (1% - 28%), é caracterizada por uma tendência quase constante em todos os níveis de favorabilidade o que implica que as variáveis em análise são pouco sensíveis neste intervalo de ponderação. A segunda é a partir de 28% em frente, é caracterizada por uma tendência variada em quase todas as variáveis analisadas, o que implica a maior sensibilidade das variáveis acima de ponderação de 28%.

Tabela 6 Resultado da Ponderação atribuída as variáveis em forma de área total dos níveis de favorabilidade em Km².

	Geoquímica Cu			VTEM			Litologia			Geoquímica Zn			Alteração Propilitica		
	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%
1 - Area (Km2)	29.8	31.8	38.7	29.8	31.9	40.3	29.9	31.6	39.6	29.7	32.0	40.8	30.7	30.4	32.5
2 - Area (Km2)	17.2	14.8	5.0	17.0	14.9	3.8	16.8	15.5	7.0	17.1	14.8	4.6	16.3	16.1	7.7
3 - Area (Km2)	0.3	0.7	3.6	0.5	0.5	3.2	0.6	0.2	0.6	0.4	0.5	1.9	0.3	0.8	7.0
	Óxidos de Ferro			Alteração Argilica			Estruturas Lineares			Mag_RTP			Grav. FTG		
	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%
1 - Area (Km2)	31.2	29.6	30.2	30.5	30.6	33.0	30.8	30.1	32.0	30.2	31.3	37.9	30.1	31.5	30.1
2 - Area (Km2)	15.8	16.8	7.9	16.6	15.9	7.6	16.2	16.4	8.1	16.7	15.4	4.4	16.6	15.3	4.2
3 - Area (Km2)	0.2	0.9	9.2	0.3	0.8	6.6	0.3	0.8	7.2	0.4	0.6	5.0	0.6	0.5	3.9
1 - Menos Fav.	2 - Fav.Moderada			3 - Area Maior Fav.											

Tabela 7 Resultado da Ponderação atribuída as variáveis em percentagens relativas as áreas dos níveis de favorabilidade.

	Geoquímica Cu			VTEM			Litologia			Geoquímica Zn			Alteração Propilitica		
	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%
1 (%)	63.0	67.2	81.8	63.0	67.4	85.1	63.2	66.7	83.7	62.9	67.6	86.3	64.9	64.2	68.8
2 (%)	36.4	31.2	10.6	35.9	31.5	8.0	35.6	32.8	14.9	36.2	31.2	9.6	34.5	34.0	16.4
3 (%)	0.6	1.6	7.6	1.1	1.1	6.9	1.2	0.5	1.4	0.9	1.2	4.1	0.6	1.7	14.8
	Óxidos de Ferro			Alteração Argilica			Estruturas Lineares			Mag_RTP			Grav. FTG		
	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%	1%	28%	64%
1 (%)	66.1	62.5	63.8	64.4	64.6	69.9	65.2	63.6	67.7	63.8	66.2	80.1	63.7	66.6	63.7
2 (%)	33.5	35.6	16.7	35.0	33.7	16.1	34.2	34.7	17.1	35.4	32.5	9.4	35.0	32.3	8.8
3 (%)	0.5	1.9	19.4	0.6	1.7	14.1	0.6	1.6	15.2	0.9	1.3	10.5	1.2	1.1	8.2

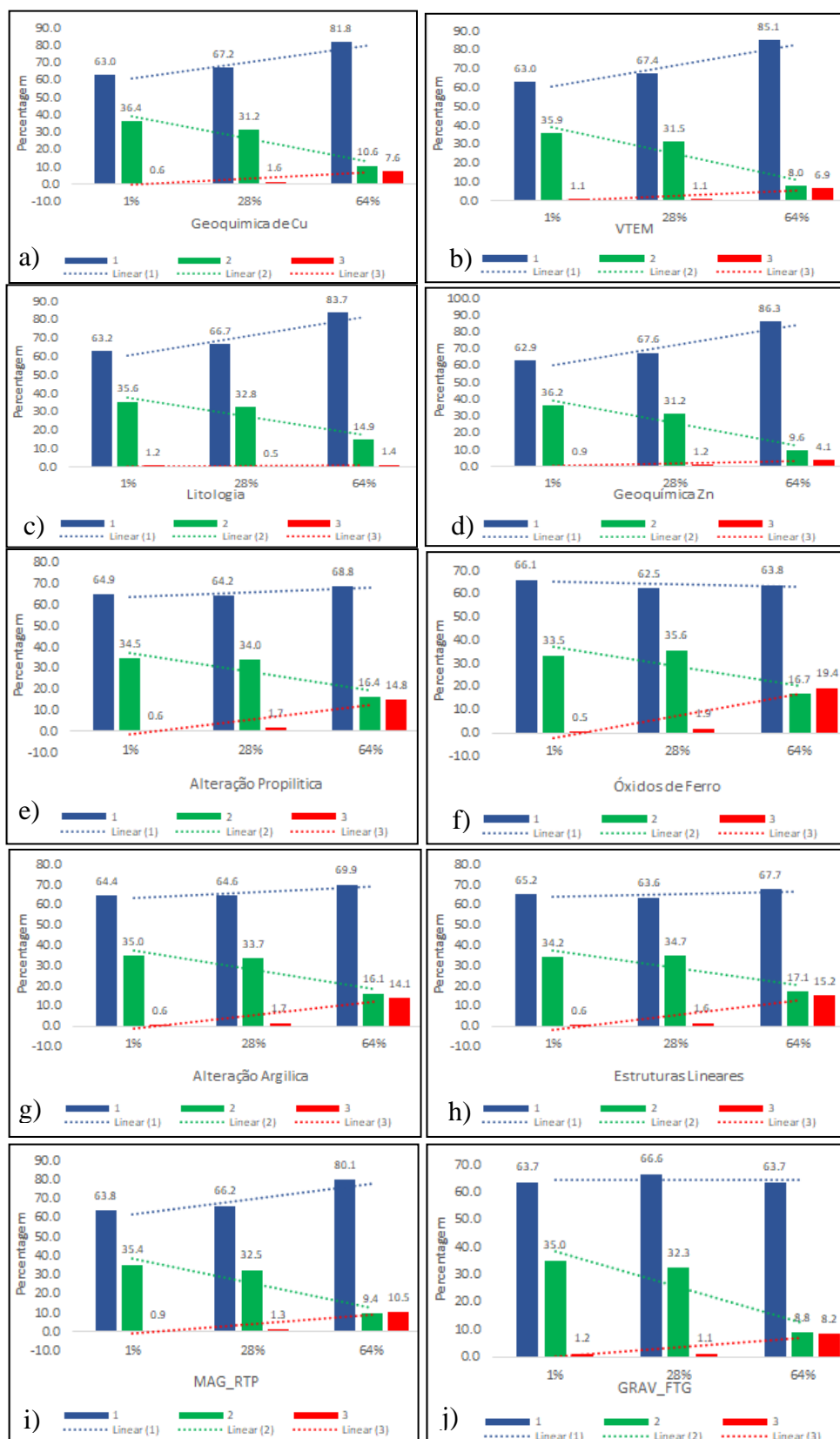


Figura 27. Gráficos de análise de sensibilidade das variáveis do modelo, com ponderação de 1%, 28% e 64% (baseados nas tabelas 4, 5, 6 e 7). a) Geoquímica Cu; b) VTEM; c) Litologia; d) Geoquímica Zn; e) Alteração propílica; f) Óxidos de ferro; g) Alteração argílica; h) Estruturas lineares; i) MAG e j) FTG.

5.5. Validação do Modelo

Uma vez que a área de estudo é um terreno *greenfield*, não são conhecidos ainda depósitos de cobre e zinco, o modelo final de favorabilidade não foi validado. Também não foi feita a observação de campo ao longo das principais áreas de favorabilidade criadas. Contudo, os resultados confirmam a utilidade e eficácia da aplicação de SIG e detecção remota na prospecção e pesquisa de cobre e zinco através de criação de modelos de favorabilidade o que de certa forma reduz o tempo e custos das actividades.

O modelo final, pode ser benéfico não apenas em explorar as melhores localizações identificadas pelo modelo, mas também investigar as áreas moderadamente favoráveis identificadas como nível 2.

5.6. Limitações do Estudo

A principal limitação para concretização deste estudo foi essencialmente, a falta de validação pela ausência de depósitos conhecidos ou pela deslocação ao terreno para a verificação das áreas de favorabilidade. Existem também limitações em termos da informação bibliográfica relacionadas com pesquisas de metais básicos na região.

A pouca presença no contexto local de especialistas na área de pesquisa de cobre e zinco. Houve limitações por falta de dados relativamente a factores de ocorrências minerais, dobramentos e índices de alteração em rocha total, que poderiam ser integrados e ter melhorado o modelo preditivo.

Também houve limitações nos dados geofísicos terrestres, mais especificamente para TDEM, que foi aplicada nas áreas circunvizinhas e conduzido a obtenção de resultados positivos de sondagem.

Foi mencionado na base de dados informação sobre estruturas resultantes de interpretação de imagens geofísicas, estes dados não foram aplicados no modelo de favorabilidade por ausência de leituras relativas aos dobramentos.

6. CONCLUSÕES

O presente estudo, conclui que a utilização integrada dos métodos geofísicos (VTEM, FTG Tzz, RTP magnéticos), geoquímicos (Cu e Zn), alteração hidrotermal (propílitica, argílica e óxidos de Ferro), geologia e estruturas lineares são fundamentais para o sucesso da prospecção e pesquisa mineira relacionada a depósitos de Cu e Zn do Tipo VMS. Estes dados representam as principais características espaciais ou guias importantes para selecção de alvos com mineralizações de cobre e zinco na área de estudo.

A detecção remota, através de imagens ASTER L1T, tem um papel muito importante na prospecção e pesquisa mineral principalmente em depósitos do tipo VMS similares a área de estudo. Foi com base nestes dados que foi possível fazer o mapeamento de alterações hidrotermais que são um dos principais guias de mineralizações neste tipo de depósitos. A alteração propílitica e óxidos de ferro, representam os tipos de alterações hidrotermais mapeadas, mais comuns. Estes sobrepõem-se aos chapéus de ferro e que foram aplicados pelos especialistas locais como um dos guias na alocação de furos de sondagem. A alteração argílica é a menos comum.

Os chapéus de ferro, coincidem com as áreas mapeadas como quartzo feldspático micáceo com/ sem pirite (localmente quartzito piritico). Esta unidade tem sido utilizada como horizonte marcante para mineralizações de Cu e Zn na área de estudo principalmente quando se encontra em sobreposição com VTEM positivo.

A modelação efectuada, obteve um resultado satisfatório, seleccionando áreas coerentes com o modelo prospectivo, porém, deve-se ressaltar que, a partir das diversas relações de importância, o factor geoquímico (Cu) acompanhado de sinal de VTEM positivo e litologia quartzo feldspático micáceo, são considerados mais importantes, para, assim, evitar que sejam seleccionadas áreas onde existam rochas sem nenhum potencial para ocorrências minerais. A geoquímica de solos é apropriada para priorização de alvos criados a partir de informação geofísica. É melhor aplicável na situação em que o depósito esteja localizado na superfície. Em depósitos identificados com sinal geofísico positivo e encontrando-se na subsuperfície, a geoquímica de solos pode não dar melhores resultados.

Três níveis de favorabilidade foram criados: menor (1), moderada (2) e maior (3). No mapa final, as áreas desfavoráveis são representadas a azul e são de menor interesse para trabalhos de prospecção e pesquisa. As áreas com favorabilidade moderada tem a representação a verde ocupando cerca de 13.55 km² da área de estudo, são áreas que necessitam de trabalhos de detalhe, pois, potenciais mineralizações de cobre e zinco podem ser identificadas. As áreas de maior favorabilidade são representadas a vermelho e ocupam cerca de 0.55 km² de toda a área de estudo, são áreas consideradas prioritárias para actividades de prospecção e pesquisa de seguimento.

As áreas de maior e moderada favorabilidade tem uma tendência SW - NE que coincide com a orientação preferencial de unidades geológicas e estruturais da região. Cinco polígonos que representam alvos de maior favorabilidade são os mais extensos na área de estudo e estas localizam-se a SW, Centro-Oeste e NE da área de estudo.

O teste do modelo de favorabilidade centrou-se na análise de sensibilidade das principais variáveis usadas onde se conclui que há necessidade de uma ponderação adequada para as variáveis sendo que a maior parte são sensíveis com aumento de ponderação. Estas são caracterizadas pela alteração dos níveis de favorabilidade quando se aumenta a percentagem de ponderação. A variável litologia, é a única que não é muito sensível para o nível de aptidão de maior favorabilidade, isto é, quando se altera a ponderação, apenas há variação da aptidão de favorabilidade menor e moderada.

Outro aspecto constatado na análise da sensibilidade foram duas tendências no comportamento das variáveis, com o aumento da ponderação. A primeira entre 1% - 28%, é quase constante em todos os níveis de aptidão e o que implica que as variáveis em análise são pouco sensíveis neste intervalo de ponderação. A segunda é acima 28% onde varia em quase todas as variáveis analisadas, o que implica a maior sensibilidade das variáveis acima de ponderação de 28%.

O resultado obtido na modelação pode ser usado para orientar a prospecção e pesquisa de Cu e Zn na etapa seguinte. Isso não apenas reduzindo o custo da prospecção e pesquisa detalhada, mas também ajudando a gerar outros mapas de potencial mineral num conjunto de dados similares.

A utilização do SIG vem ajudar, cada vez mais, a prospecção e pesquisa mineral diminuindo consideravelmente os custos envolvidos, uma vez que a descoberta de novos depósitos minerais se torna mais difícil.

A modelação de favorabilidade mineral de Cu e Zn na área de estudo, constitui um dos primeiros estudos feitos na região de Montepuez no Norte de Moçambique. Trata-se de um ambiente *greenfield* sem depósitos VMS conhecidos. Foi aplicada uma abordagem orientada pelo conhecimento na atribuição de pesos dos factores analisados.

Para o mapa final procurou-se buscar a ponderação e atribuir notas as variáveis e os seus elementos considerando a realidade da área estudada. Contudo, a pesquisa apresentada permite que novas variáveis sejam acrescentadas de forma a enriquecer o resultado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abrams, M., Tsu, H., Hulley, G., Iwao, K., Pieri, D., Cudahy, T. & Kargel, J. (2015). The advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) after fifteen years: review of global products. *Int J Appl Earth Obs Geoinf.*, 38, 292–301.
- Abuzied, S.M., Ibrahim, S.K., Kaiser, M.F., & Seleem, T. A. (2016). Application of remote sensing and spatial data integrations for mapping porphyry copper zones in nuweiba area, Egypt. *Int. J. Signal Process. Syst.* 4 (2)., 102–108.
- Akcaay, M. & C. J. M. (2004). The environmental impact of mining in the Pontides, Turkey: reconnaissance sampling and GIS-based analysis. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4, 317–328.
- Al-Mashreki, M. H., Akhir, J. B. M., Rahim, S. A., Desa, K. M., Lihan, T., & Haider, A. R. (2011). GIS-Based Sensitivity Analysis of Multi-Criteria Weights for Land Suitability Evaluation of Sorghum Crop in the Ibb Governorate, Republic of Yemen. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 1(9), 1102–1111. Obtido de <https://pdfs.semanticscholar.org/06d9/502ed56b3329a3f3f37c72f97a777934c70e.pdf>
- Alimohammadi, M., Alirezai, S., & Kontak, D. J. (2015). Application of ASTER data for Daraloo-Sarmeshk, exploration of porphyry copper deposits: a case study of area, southern part of the Kerman copper belt, Iran. *Ore Geology Reviews*, 70, 290–304.
- Allen, R.L., Weihed, P., & Svenson, S. Å. (1996). Setting of Zn–Cu–Au–Ag massive sulfide deposits in the evolution and facies architecture of a 1.9 Ga marine volcanic arc, Skellefte district, Sweden. *Economic Geology*, 91, 1022–1053.
- Aly, M. H., Giardino, J. R., & Klein, A. G. (2005). Suitability Assessment for New Minia City, Egypt: A GIS Approach to Engineering Geology. *Environmental and Engineering Geoscience*, 11(3), 259–269. <https://doi.org/10.2113/11.3.259>
- Anderson, G. P., Felde, G. W., Hoke, M. L., Ratkowski, A.J., Cooley, T.W., Chetwynd, Jr J.H.,...Berk, A. (2002). MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm: FLAASH (fast line-of-sight atmospheric analysis of spectral hypercubes). Em P. E. Shen, S.S. & Lewis (Ed.), *Algorithms and Technologies for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VIII (Proceedings of SPIE)* (pp. 65–71). Society of Photo Optics: Orlando, FL, USA;
- Antenucci, J.C.; Brown, K.; Croswell, P. L., Kevany, M. J., & Archer, H. (1991). *Geographic information systems: a guide to the technology*. Van Nostrand Reinhold. p 301. Obtido de <https://trid.trb.org/view/368512>
- Araujo, C. C. & Macedo, A. B. (2002). Multicriteria Geologic Data Analysis for Mineral Favorability Mapping: Application to a Metal Sulphide Mineralized Area, Ribeira Valley Metallogenic Province, Brazil. *Natural Resources Research*, 11(No1), 29–43. <https://doi.org/10.1023/A:1014235703541>
- Aronoff, S. (1989). *Geographyc Information Systems: a management perspective*. WDL publications. Ottawa, Canada. p 294.

- Arthurs, J. W. (2012). *The Geology of the Ntola Area, Northern Mozambique*. First Draft. p 34.
- Bingen, B., Jacobs, J., Viola, G., Henderson, I.H.C., Skår, Ø., Boyd, R., Daudi, E. X. F. (2009). Geochronology of the Precambrian crust in the Mozambique belt in NE Mozambique, and implications for Gondwana assembly. *Precambrian Research*, 170(3–4), 231–255. <https://doi.org/10.1016/J.PRECAMRES.2009.01.005>
- Bingen, B., Viola G., Henderson I.H.C., Smethurst M., Boyd R., Thomas R.J.,...Tveten, E. (2006). Geochronology of Pan-African terrain assembly in the NE Mozambique. *21st Colloquium of African Geology, Maputo, Mozambique. Abstracts*, 12–14. Obtido de https://www.researchgate.net/profile/Bob_Thomas4/publication/260247736_Bingen_B_Viola_G_Henderson_IHC_Smethurst_M_Boyd_R_Thomas_RJ_Bjerkgaard_T_Feito_P_Hollick_LM_Jacobs_J_Key_RM_Rossi_D_Sandstad_JS_Skar_O_Smith_R_Solli_A_2006_Geochronology_Of_Pan-African
- Blum, M. L. B. (1999). *Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e Sua Aplicação à Geologia Regional e à Prospeção Mineral*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília/ Instituto de Geociências. Obtido de http://mw.eco.br/ig/posg/dout/tese030/tese030_Cap04.pdf
- Bonham-Carter, G. F., Agterberg, F. P., & Wright, D. F. (1988). Integration of geological datasets for gold exploration in Nova Scotia: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 54, No. 11, 1585–1592. Obtido de www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1988journal/nov/1988_nov_1585-1592.pdf.
- Bonham-Carter, G. F. (1994). *Geographic information systems for geoscientists, modelling with GIS*. Pergamon Press. Oxford. Obtido de <https://www.elsevier.com/books/geographic-information-systems-for-geoscientists/bonham-carter/978-0-08-041867-4>
- Botwe, T., Jnr Osei, E.M., Kwaw, A.K., & Omitogun, A. A. (2018). Hydrothermal Alteration mapping using Remote Sensing and GIS at the Prestea Concession of Golden Star Bogoso/Prestea Ltd, Ghana. *International Journal of Engineering Science and Computing*, 8(No1), 15898–15902. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/322593258_Hydrothermal_Alteration_mapping_using_Remote_Sensing_and_GIS_at_the_Prestea_Concession_of_Golden_Star_BogosoPrestea_Ltd_Ghana
- Boyd, R., Nordgulen, Ø., Thomas, R. J., Bjerkgård, T., Grenne, T., Henderson, I.,...Bingen, B. (2010). The geology and geochemistry of the East African Orogen in NE Mozambique. *South African Journal of Geology*, 113, 87–129. Obtido de http://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/9851/1/87_129_Boyd_et.al..pdf.
- Brew, G.E., Barazangi, M., Sawaf, T., & Al-Maleh, K. (2000). Tectonic Map and Geologic Evolution of Syria: The Role of GIS. *The Leading Edge*, 176–182. Obtido de http://atlas.geo.cornell.edu/syria/brew_tle_2000.html

- Buttinelli, M., Procesi, M., Pignone, M., & Quattrocchi, F. (2013). Spatial analysis and weighted overlay models as decision-making tools for geothermal resources exploration and exploitation: the Southern Italy case study. *European Geothermal Congress*, 1–8. Obtido de https://www.researchgate.net/profile/Monia_Procesi/publication/241702319_Spatial_analysis_and_weighted_overlay_models_as_decision-making_tools_for_geothermal_resources_exploration_and_exploitation_the_Southern_Italy_case_study/links/0deec51cac27f8abbb0000
- Cabral, P. (2016). *MODELAÇÃO EM SIG. Módulo 1. MESTRADO / PÓS-GRADUAÇÃO EM C&SIG. Universidade Nova de Lisboa, Portugal.*
- Carranza, E. J. M., & Sadeghi, M. (2010). Predictive mapping of prospectivity and quantitative estimation of undiscovered VMS deposits in Skellefte district (Sweden). *Ore Geology Reviews*, 38(3), 219–241. Obtido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016913681000020X?via%3Dihub>
- Clark, R. N. (1999). Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing: Chapter 1 - Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. *US Geological Survey*, 3(3), 3–58. Obtido de <https://pdfs.semanticscholar.org/1e02/a41e9ff88cdf80bbe41bd81ecde71e779548.pdf>
- Cowen, D. J. (1988). GIS versus CAD versus DBMS: what are the differences? ". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11), 1551–1554. Obtido de https://www.asprs.org/wp-content/uploads/pers/1988journal/nov/1988_nov_1551-1555.pdf
- Cox, D.P., & Singer, D. A. (1986). Mineral deposit models. *United States Geological Survey Bulletin*, 1693, 379. Obtido de <https://pubs.usgs.gov/bul/1693/report.pdf>
- Crosta, A.P., & Moore, J. M. (1989). Geological mapping using landsat thematic mapper imagery in Almeria province, southeast Spain. *Int J Remote Sens.*, 10, 505–514.
- CSIRO. (2010). Spectral Sensing Instruments – Remote Systems. *Spectral In-House Training @ CET, UWA, Crawley -3rd year Geology Lab*, 25. Obtido de <ftp://ftp.csiro.au/arrc/CET> Spectral Workshop/05_SpectralInHouseTraining_SpectralSensors_remote.ppt
- Dobesova, Z. (2012). Database Modelling in Cartography: Database Model for the Atlas of Election to the Olomouc Region Council. *Geodesy and Cartography*, 10pgs. <https://doi.org/10.3846/20296991.2012.679768>
- Duuring, P., Hagemann, S.G., Novikova, Y., Cudahy, T., & Laukamp, C. (2012). Targeting Iron Ore in Banded Iron Formations Using ASTER Data: Weld Range Greenstone Belt, Yilgarn Craton, Western Australia. *Economic Geology*, 107, 585–597.
- Eastman, J. R., Jin, W., Kyem, A. K., & Toledano, J. (1995). Raster procedures for multi-criteria/multi objective decisions: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 61, 539–547.

- Eastman, J. R. (1997). *Idrisi for Windows, User's Guide version 2.0. Introduction*. Worcester-MA, Graduate School of Geography, Clark University. p. 1-1 to 3-19.
- ESRI. (2019). Portal of Environmental Systems Research Institute. Obtido de <http://www.esri.com>
- Evans, D. M. (2014). *The Ntola Prospects in Northern Mozambique. Consulting Report For Rovuma Resources Lda*. Versailles - France.
- Federal Interagency Coordinating Committee on Digital Cartography. (1988). A process for evaluating geographic information systems. *Technology Exchange Working Group-Technical Report 1. U.S. Geological Survey Open-File Report, 1*, 88–105.
- Fruchting, A., Boniatti, J.H., Oliveira, G., Oliveira, S. B., Ravacci, P. F., Paulo, F. & Henrique, E. (2009). Aplicação dos métodos eletromagnéticos aéreos e de polarização induzida espectral em mineralizações de cobre/zinco tipo VMS. Em *11th International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF 2009, Salvador, Bahia, Brazil, 24-28 August 2009* (pp. 472–479). Society of Exploration Geophysicists and Brazilian Geophysical Society. <https://doi.org/10.1190/sbgf2009-106>
- Grove, C.I., Hook, S.J., & Paylor II, E. D. (1992). *Laboratory reflectance spectra of 160 minerals, 0.4 to 2.5 micrometers*. JPL Publication 92-2, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, CA. p. 394.
- Harris, D. P. (1984). Mineral resources appraisal. *Clarendon Press, Oxford*, 445.
- Hasui, Y., Carneiro, C., Almeida, F. F. M. de, & Bartorell, A. (2012). RECURSOS MINERAIS. Em Beca (Ed.), *Geologia do Brazil* (pp. 814–832). São Paulo: João Batista Guimarães Teixeira. Obtido de https://www.researchgate.net/publication/317497896_RECURSOS_MINERAIS
- Holmes, A. (1951). The sequence of pre-Cambrian orogenic belts in south and central Africa. *18th Int. Geol. Cong., London (1948)*, 14, 254–269.
- Honarmand, M., Ranjbar, H., & Shahabpour, J. (2012). Application of principal component analysis and spectral angle mapper in the mapping of hydrothermal alteration in the Jebal-Barez Area, Southeastern Iran. *Resour. Geol.*, 62, 119–139.
- Hosseinjani, Z. M., & Tangestani, M. H. (2011). Using, Mapping alteration minerals sub-pixel unmixing of ASTER data in the Sarduiyeh area, SE Kerman, Iran. *Int. J. Digit. Earth*, 4(6), 487–504.
- Hosseinjani, Z. M., Tangestani, M.H., Roldan, F.V., & Yusta, I. (2014a). Spectral characteristics of minerals in alteration zones associated with porphyry copper deposits in the middle part of Kerman copper belt, SE Iran. *Ore Geol. Rev.*, 62, 191–198. <https://doi.org/10.1016/J.OREGEOREV.2014.03.013>
- Hosseinjani, Z. M., Tangestani, M.H., Roldan, F.V., & Yusta, I. (2014b). Sub-pixel mineral mapping of a porphyry copper belt using EO-1 Hyperion data. *Adv. Space Res.*, 53, 440–451. <https://doi.org/10.1016/J.ASR.2013.11.029>

- Hunt, G.R., & Salisbury, J. W. (1976). Mid-infrared spectral behavior of metamorphic rock. Air Force Cambridge Research Laboratory. *Environmental Research Papers*, 543, 67.
- IAEA. (1994). *Spatial data integration for mineral exploration, resource assessment and environmental studies: A guidebook*. VIENNA: International Atomic Energy Agency. IAEA-TECDO-782, IAEA, Vienna. Obtido de https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_782.pdf
- Jamal, D. L. (2005). *Crustal studies across selected geotransects in NE Mozambique: differentiating between Mozambican (Kibaran) and Pan Africa events, with implication for Gondwana studies*. (PhD Thesis). University of Cape Town, Cape Town.
- John, D.A., Ayuso, R.A., Barton, M.D., Blakely, R.J., Bodnar, R.J., Dilles, J.H., Gray,...Vikre, P. G. (2010). Porphyry copper deposit model Chapter B of Mineral Deposit Models for Resource Assessment. *U.S. Geological Survey*, 186, xii, 169. <https://doi.org/10.3133/sir20105070B>
- Katz, S. Z. (1991). Emulating expert system with raster GIS. *Computers & Geosciences*, 17, No. 7, 1033–1050.
- Kröner, A., Sacchi, R., Jaeckel, P., & Costa, M. (1997). Kibarian magmatism and Pan-African granulite metamorphism in northern Mozambique: single zircon ages and regional implications. *Journal of African Earth Sciences*, 25, 467–484.
- Kruse, F.A., Boardman, J.W., & Huntington, J. F. (2003). Comparison of airborne hyperspectral data and EO-1 Hyperion for mineral mapping. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens*, 41(6), 1388–1400.
- Kruse, F.A., Lefkoff, A.B., Boardman, J.W., Heidebrecht, K.B., Shapiro, A.T., Barloo, P.J., & Goetz, A. F. H. (1993). The Spectral Image Processing System (SIPS) – Interactive visualization and analysis of imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment*, 44, n.2, 145–163.
- Lobão, J. S. B., Franca-Rocha, W. de J. S., Silva, A. B. da. (2011). Geoprocessamento na modelagem da vulnerabilidade natural à erosão no município de Morro do Chapéu-Ba. *Revista Brasileira de Cartografia*, 63(1), 101–114. Obtido de <http://www.lsie.unb.br/rbc/index.php/rbc/article/viewFile/362/354>
- Lowell, J. D. & Guilbert, J. M. (1970). Lateral and vertical alteration mineralization zoning in porphyry ore deposits. *Econ. Geol. Bull. Soc*, 65, 373–408.
- Melezhik, V.A., Bingen, B., Fallick, A.F., Gorokhov, I.M., Kuznetsov, A.B., Sandstad, J.S.,...Moniz, A. (2008). Isotope chemostratigraphy of marbles in northeastern Mozambique. apparent depositional ages and regional implications. *Precambrian Research*, 162, 540–558.
- Norconsult Consortium. (2007). *Mineral resources management capacity building project, Republic of Mozambique; component 2: Geological infrastructure development project, geological mapping lot 1*. Sheet explanation, Rep. B6. f., 32 sheets, scale 1:250,000, 778 pp. + annexes, ational Directorate of Geology, Maputo, Mozambique.

- Nwer, B. A. B. (2005). *The application of land evaluation technique in the north-east of Libya* (PhD Thesis). Faculty of Environment, Cranfield University. Obtido de https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/handle/1826/1125/Nwer_Thesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Oliveira, D. S. (2014). *Interpretação de dados aerogeofísicos para exploração aurífera na área do Projeto Córrego do Sítio, NE do Quadrilátero Ferrífero*. (Dissertação de mestrado). Departamento de Geofísica. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Orange, D. L. & Angell, M. (1999). Applications of multibeam mapping to exploration and production: Detecting seeps, mapping geohazards, and managing data overload with GIS. *The Leading Edge*, 495–501.
- Osman, M. S. (2012). *Mineral Exploration Using GIS. Term Paper* (No. 112). City and Regional Planning Department. King Fahad University of Petroleum and Minerals. Obtido de <https://pt.scribd.com/document/372128550/9-Term112-Report-Motasim>
- Pawlowski, R. (2000). GIS applied to exploration: Caserta Block, Central Apennines, southern Italy. *The Leading Edge*, 19(2), 193–196. <https://doi.org/10.1190/1.1438574>
- Perkins, T., Adler-Golden, S., Matthew, M.W., Berk, A., Bernstein, L.S., Lee, J., & Fox, M. (2012). Speed and accuracy improvements in FLAASH atmospheric correction of hyperspectral imagery. *SPIE Optical Engineering*, 51(11), 111707. <https://doi.org/10.1117/1.OE.51.11.111707>
- Pinna, P., Jourde, G., Calvez, J. Y., Mroz, J. M., & Marques, J. M. (1993). The Mozambique Belt in northern Mozambique: Neoproterozoic (1100-850 Ma) crustal growth and tectogenesis, and superimposed Pan-African (800-550 Ma) tectonism. *Precambrian Research*, 62(1–2), 1–59. [https://doi.org/10.1016/0301-9268\(93\)90093-H](https://doi.org/10.1016/0301-9268(93)90093-H)
- Pinto, I. (2009). Introdução aos Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Obtido 6 de Agosto de 2019, de <https://www.passeidireto.com/arquivo/22926089/slide-de-sig>
- Pohl, D. (2011). *Report on a field review of mineral tenements and prospects held by Rovuma Resources in Northern Mozambique*. Los Angeles, CA 90018-1407, U.S.A.
- Pour, A.B. & Hashim, M. (2012). The application of ASTER remote sensing data to porphyry copper and epithermal gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 44, 1–9.
- Pour, A.B. & Hashim, M. (2015). Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, southeastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science*, 9(2), 155–166. <https://doi.org/10.1016/J.JTUSCI.2014.11.008>
- Rajendran, S., & Nasir, S. (2014). Hydrothermal altered serpentized zone and a study of Ni magnesioferrite–magnetite–awaruite occurrences in Wadi Hibi, Northern Oman Mountain: discrimination through ASTER mapping. *Ore Geology Reviews*, 62, 211–226.

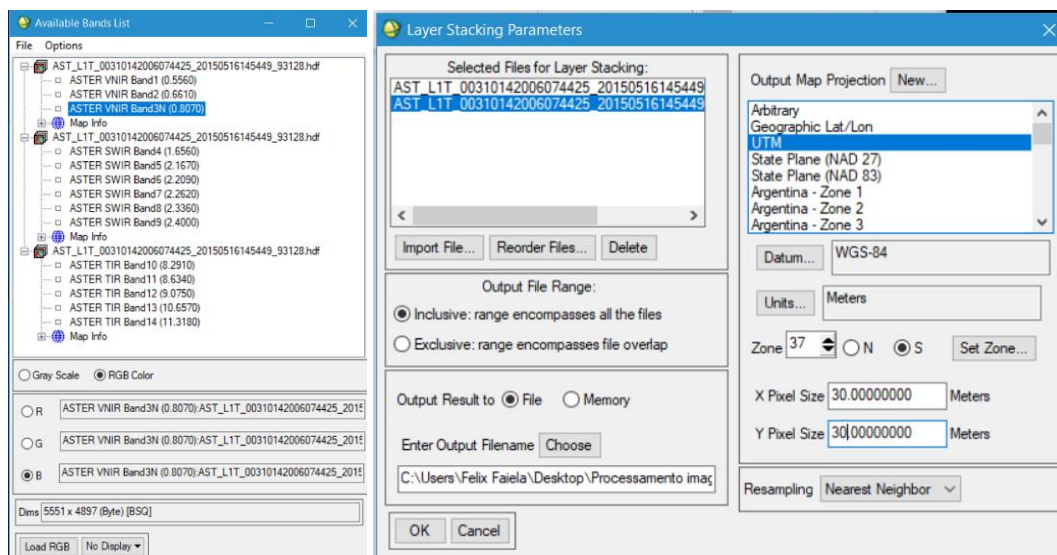
- Rajendran, S., Nasir, S., Kusky, T.M., Ghulam, A., Gabr, S., & El Ghali, M. (2013). Detection of hydrothermal mineralized zones associated with Listwaenites rocks in the Central Oman using ASTER data. *Ore Geology Reviews*, 53, 470–488.
- Rajendran, S. & Nasir, S. (2017). Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geology Reviews*, 88, 317–335.
- Rostirolla, S. P.; Soares, P. C.; & Chang, H. K. (1998). Bayesian and multivariate methods applied to favorability quantification in Reconcavo Basin and Ribeira Belt, Brazil. *Nonrenewable Resources*, 7, No1, 7–24.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation. *1ed. Pasadena: JPL Publication (NASA/GSFC)*, 151.
- Rowan, L.C., Hook, S.J., Abrams, M.J., & Mars, J. C. (2003). Mapping hydrothermally altered rocks at Cuprite, Nevada, using the advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER), a new satellite-imaging system. *Econ Geol.*, 98, 1019–1027.
- Rowan, L.C., Schmidt, R.G., & Mars, J. C. (2006). Distribution of hydrothermally altered rocks in the Reko Diq, Pakistan mineralized area based on spectral analysis of ASTER data. *Remote Sens Environ*, 104, 74–87.
- Roy, B. (1996). *Multicriteria Methodology Goes Decision Aiding*. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Berlim. Obtido de <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4757-2500-1>
- Sabins, F. F. (1999). Remote sensing for mineral exploration. *Ore Geology Reviews*, 14, 157–183. [https://doi.org/10.1016/S0169-1368\(99\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1368(99)00007-4)
- Seber, D, Steer, D., Sandvol, E., Sandvol, C., Brindisi, C., & Barazangi, M. (2000). Design and Development of Information Systems for the Geosciences: An Application to the Middle East. *GeoArabia*, 5(2), 295–322. Obtido de <http://atlas.geo.cornell.edu>.
- Shahi, H. & Kamkar-Rouhani, A. (2014). A GIS-based weights-of-evidence model for mineral potential mapping of hydrothermal gold deposits in Torbat-e-Heydarieh area. *Journal of Mining & Environment*, Vol.5, No., 79–89.
- Shahriari, H., Ranjbar, H., & Honarmand, M. (2013). Segmentation, Image Fractal, hydrothermal alteration mapping using PCA and concentration–area model. *Nat. Resour. Res.*, 22, 191–206.
- Shanks III, W. C. P. (2012). Hydrothermal Alteration. Em *Volcanogenic Massive Sulfide Occurrence Model* (p. 12). Scientific Investigations Report 2010–5070–C. U.S. Geological Survey, Reston, Virginia. Chap 11, 12 p. Obtido de <http://www.usgs.gov/pubprod>
- Tomlin, C. D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modelling*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 249.

- Vicente, L.E., & Souza, F. C. R. de. (2011). Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing of Environment*, *115* (8), 1824–1836.
- Viola, G., Henderson, I.H.C., Bingen, B., Thomas, R.J., Smethurst, M.A., & Azavedo, S. (2008). Growth and collapse of a deeply eroded orogen: Insights from structural and geochronological constraints on the Pan-African evolution of NE Mozambique. *Tectonics*, *27*, TC5009. <https://doi.org/10.1029/2008TC002284>
- Vivallo, W. & Willdén, M. (1988). Geology and geochemistry of an early Proterozoic volcanic arc sequence at Kristineberg, Skellefte district, Sweden. *Geologiska Föreningens i Stockholm Förhandlingar*, *110*, 1–12. <https://doi.org/DOI:10.1080/11035898809453113>
- Willdén, M. (1986). Geology of the western part of the Skellefte field and the Kristineberg and Hornträsk sulphide deposits. *Sveriges Geologiska Undersökning Ser. Ca*, *62*, 7th IAGOD Symposium, Excursion Guide No 4: 46-54.

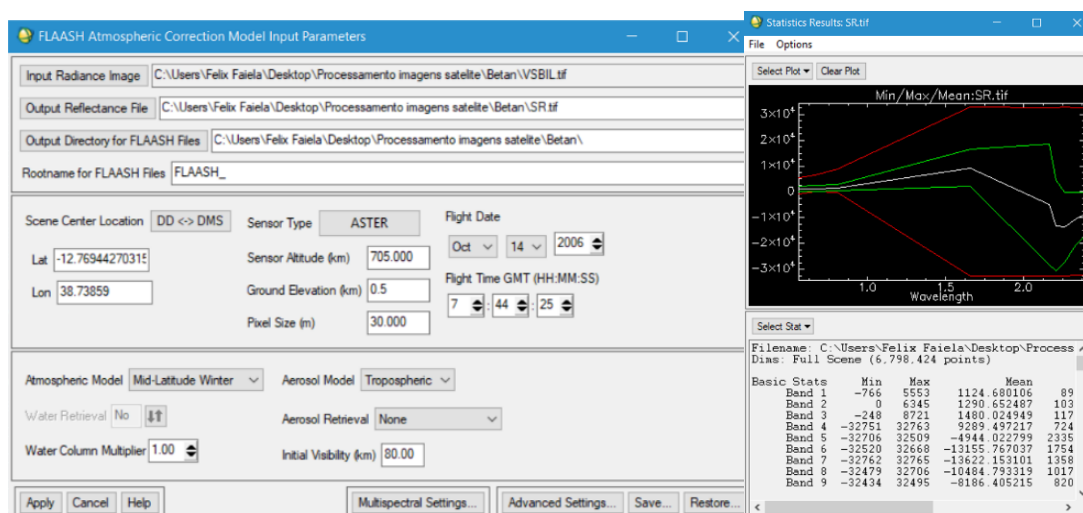
ANEXOS

ANEXO A: PRÉ-PROCESSAMENTO DE DADOS DE IMAGENS ASTER

- a) Lista de bandas aplicadas no pré-processamento (imagem a direita). Empilhamento de camadas (bandas VNIR-SWIR) para criar arquivo de bandas VNIR e SWIR (imagem a direita). Bandas de entrada reamostradas e reprojectadas para um tamanho de pixel comum de 30m.

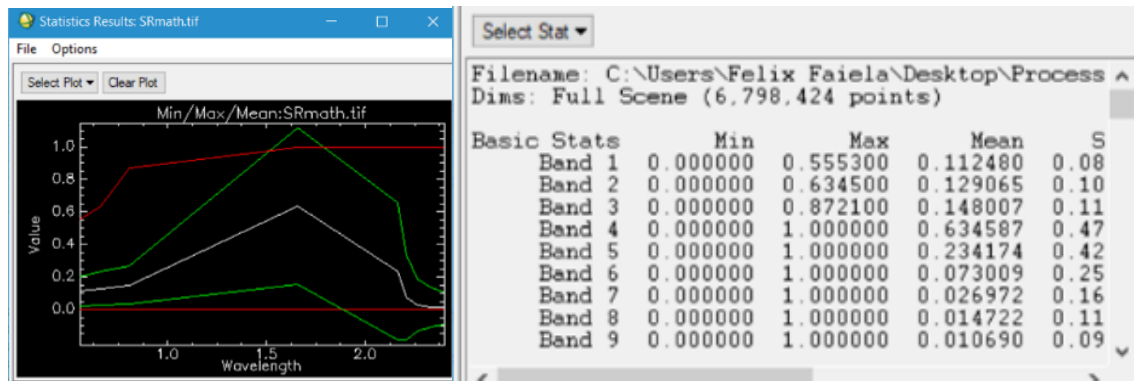


- b) Processo da Correção atmosférica *FLAASH*. Parâmetros de entrada do modelo de correcção atmosférica e resultados estatísticos finais.

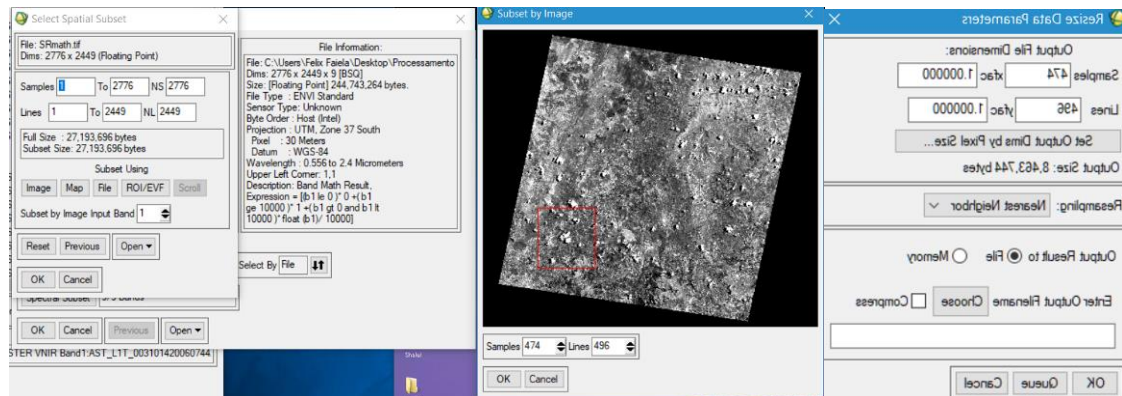


c) Aplicação do *Band Math* Pós correcção atmosférica *FLAASH*

$(b1 \leq 0) * 0 + (b1 \geq 10000) * 1 + (b1 > 0 \text{ and } b1 < 10000) * \text{float}(b1) / 10000$

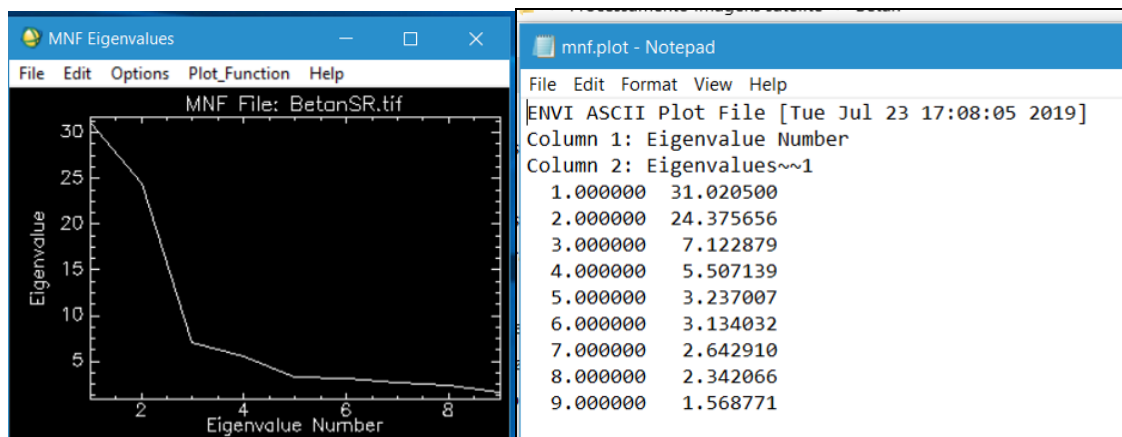


d) Redimensionamento da imagem

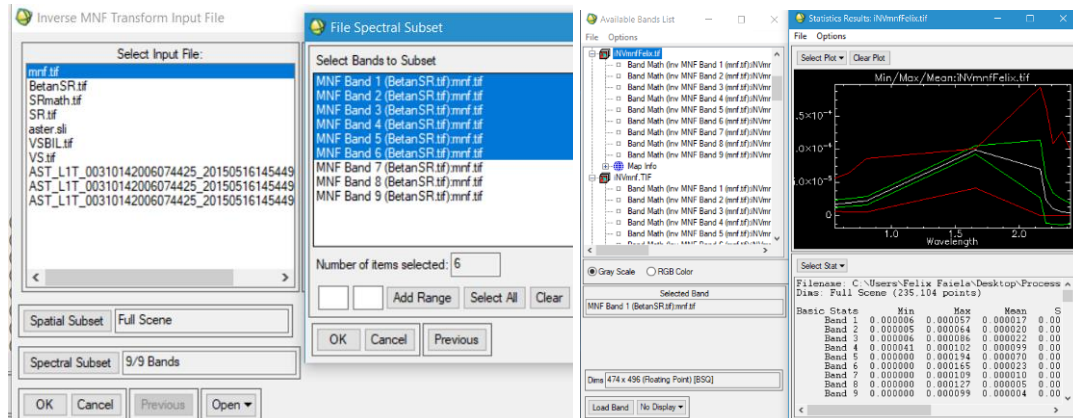


e) Redução do Ruído.

Estatística da redução do ruído dos dados. Reduziu-se o ruído do ASTER SWIR, a partir da análise de transformação mínima do ruído (MNF).



f) Os dados do ASTER SWIR compilados usando o MNF inverso



ANEXO B: QUESTIONÁRIO ENVIADO A GEOLOGOS ESPECIALISTAS

Carta de Pedido de Preenchimento do Questionário

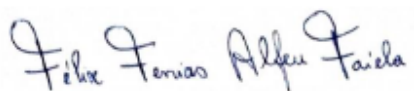
Estimado geólogo especialista na prospecção e pesquisa de cobre e zinco em depósitos do tipo VMS ocorrendo a Sul do distrito de Montepuez nas áreas de licença de *Rovuma Resources*. Pedimos o seu contributo no preenchimento do questionário a seguir, que tem o objectivo de colectar informação para um estudo do curso de mestrado em Ciências e Sistemas de Informação Geográfica na Universidade Nova de Lisboa. O estudo, faz a modelação para o mapeamento da favorabilidade de Cu e Zn na área acima mencionada. Para alcançar os objectivos do estudo, foi desenhada uma metodologia que se baseia no desenvolvimento de modelo de exploração aplicando técnicas de geoprocessamento para dados litológicos, geoquímica de solos (Cu e Zn), estruturas lineares, geofísica (FTG, VTEM e Magnetometria) e alteração hidrotermal. Porém, a análise multicritério de dados através da sobreposição ponderada e geração de classes de favorabilidade para os atributos das variáveis envolvidas no processo serão relevantes no estudo. As áreas finais de favorabilidade de Cu e Zn dependeram das ponderações acima mencionadas para as variáveis prospectivas.

As questões apresentadas, estão inseridas no processo de tomada de decisão para favorabilidade de Cu e Zn e carecem de geólogos especialistas com diferentes conhecimentos em depósitos do tipo VMS na área de Montepuez. A decisão consiste na escolha de quais as variáveis ou atributos das variáveis em análise, são adequadas e compatíveis a ocorrência de Cu e Zn.

O questionário pode ser enviado para o endereço eletrónico: felixfaela@gmail.com.

Em caso de dúvidas e sugestões, entre em contacto pelo telefone +258 84 4222337

Agradeço pela vossa colaboração.



(Geólogo)

Mestrando do curso de Ciência e Sistemas de Informação Geográficas
NOVAIMS - Universidade Nova de Lisboa

QUESTIONÁRIO

1. Dos critérios abaixo, faça a distribuição das percentagens (0-100%) da influência para a favorabilidade de cobre e zinco, para a área de estudo mencionada na carta. A soma de todas influências deve igualar a 100%.

Critério	Influência %
Litologia	
Geoquímica Cu	
Geoquímica Zn	
Alteração Propilitica	
Oxidos de Ferro	
Alteração Argilica	
Electromagnetometria VTEM	
Aeromagnetometria RTP	
Aerogravimetria FTG	
Estruturas Lineares	
Total	100

2. A tabela que se segue define as escalas de importância aplicadas no estudo. Indique o peso de cada atributo nos diferentes critérios/ variáveis identificadas nas tabelas (a, b, c, d, e, f), tendo em consideração a importância na favorabilidade de Cu e Zn. Se for necessário, defina mais atributos e julgue-as em relação as que já foram criadas.

Intervalo de Importância	ESCALA VERBAL (de importância)	Escala numérica (de importância)
Maior	Definitivamente Maior	9
	Maior	8
Moderado	Moderada a Maior	7
	Moderada	6
	Menor a Moderada	5
Menor	Menor	4
	Muito Menor	3
	Definitivamente Menor	2
	Sem Nenhuma Importancia	1

- a) Pesos para Intervalos definidos de Geoquímica de Cu

Critério	Atributos	Pontos
Geoquímica Cu (ppm)	00.00-53.84	
	53.85- 75.00	
	75.00-171.22	
	171.23-228.30	
	228.31-285.37	
	285.38-342.45	
	342.46-399.52	

b) Pesos para Intervalos definidos de Geoquímica de Zn

Critério	Atributos	Pontos
Geoquímica Zn (ppm)	1.08-45.32	
	45.33-82.75	
	82.76-137.19	
	137.20-218.86	
	218.87-341.36	
	341.37-538.72	
	538.73-868.79	

c) Pesos para Intervalos definidos pelo sinal de VTEM (acompanhado de imagem processada com definição das cores de anomalias)

Critério	Atributos	Pontos
VTEM (BGR)	O.O- 141 (B)	
	141 - 198 (G)	
	198 - 255 (R)	

d) Pesos para Intervalos definidos pelo sinal de aerogravimetria_FTG (acompanhado de imagem processada com definição das cores de anomalias)

Critério	Atributos	Pontos
Aerogravimetria_FTG (BGR)	O.O- 141 (B)	
	141 - 198 (G)	
	198 - 255 (R)	

e) Pesos para Intervalos definidos pelo sinal de aeromagnetometria_RTP (acompanhado de imagem processada com definição das cores de anomalias)

Critério	Atributos	Pontos
Aeromagnetometria_RTP (BGR)	O.O- 141 (B)	
	141 - 198 (G)	
	198 - 255 (R)	

f) Pesos para os tipos de litologias definidos

Critério	Atributos	Pontos
Litologia	Quartzo Feldspático (recristalizado)	
	Quartzo Feldspático Micáceo com/ sem pirite	
	Piroxenito	
	Granulito Máfico	
	Granulito Intermédio	
	Gabbro	
	BMF	
	Xisto Grafítico	

3. Indique três áreas de influência (distâncias em metros), definidas por alterações hidrotermais e estruturas lineares propilitica para favorabilidade maior, moderado e menor. Indique para cada área de influência o respectivo peso da importância na favorabilidade de Cu e Zn. Se for necessário, acrescente mais áreas de influência e julgue-as em relação as que já foram estabelecidas.

a) Pesos das áreas de influência definidas para alteração argílica

Critério	Area	Distancia de influência	Pontos
Alteração Propilitica	1		
	2		
	3		

b) Pesos das áreas de influência definidas para alteração argílica

Critério	Area	Distancia de influência	Pontos
Alteração Argílica	1		
	2		
	3		

c) Pesos das áreas de influência definidas para óxidos de ferro

Critério	Area	Distancia de influência	Pontos
Óxidos de Ferro	1		
	2		
	3		

d) Pesos das áreas de influência definidas estruturas lineares

Critério	Area	Distancia de influência	Pontos
Estruturas Lineares	1		
	2		
	3		

**ANEXO C: DISTANCIA DE INFLUÊNCIA E RESPECTIVA PONTUAÇÃO
PARA ALTERAÇÃO HIDROTERMAL E ESTRUTURAS LINEARES**

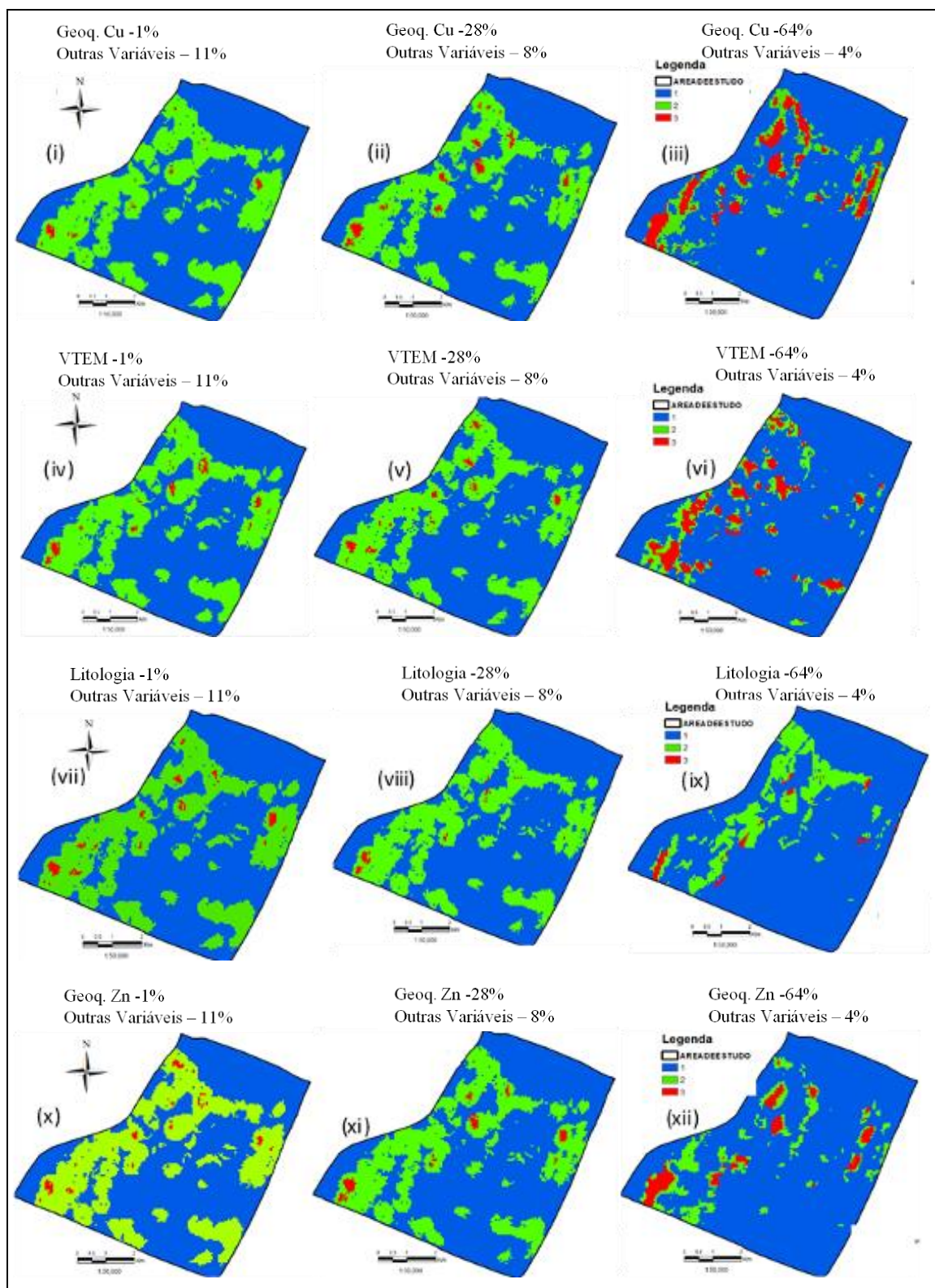
	Especialista 1		Especialista 2	
Variavel	Distancia de Influencia	Pontos	Distancia de Influencia	Pontos
Alteração Propilitica	0 - 100	9	0 -150	9
	100 - 200	6	150 -300	7
	200 - 300	4	300 -450	2
Óxidos de Ferro	0 - 100	9	0 -150	9
	100 - 200	6	150 -300	7
	200 - 300	4	300 -450	2
Alteração Argilica	0 - 100	9	0 -150	9
	100 - 200	6	150 -300	7
	200 - 300	4	300 -450	2
Estruturas Lineares	0 - 100	8	0 -150	9
	100 - 200	5	150 -300	7
	200 - 300	1	300 -450	2

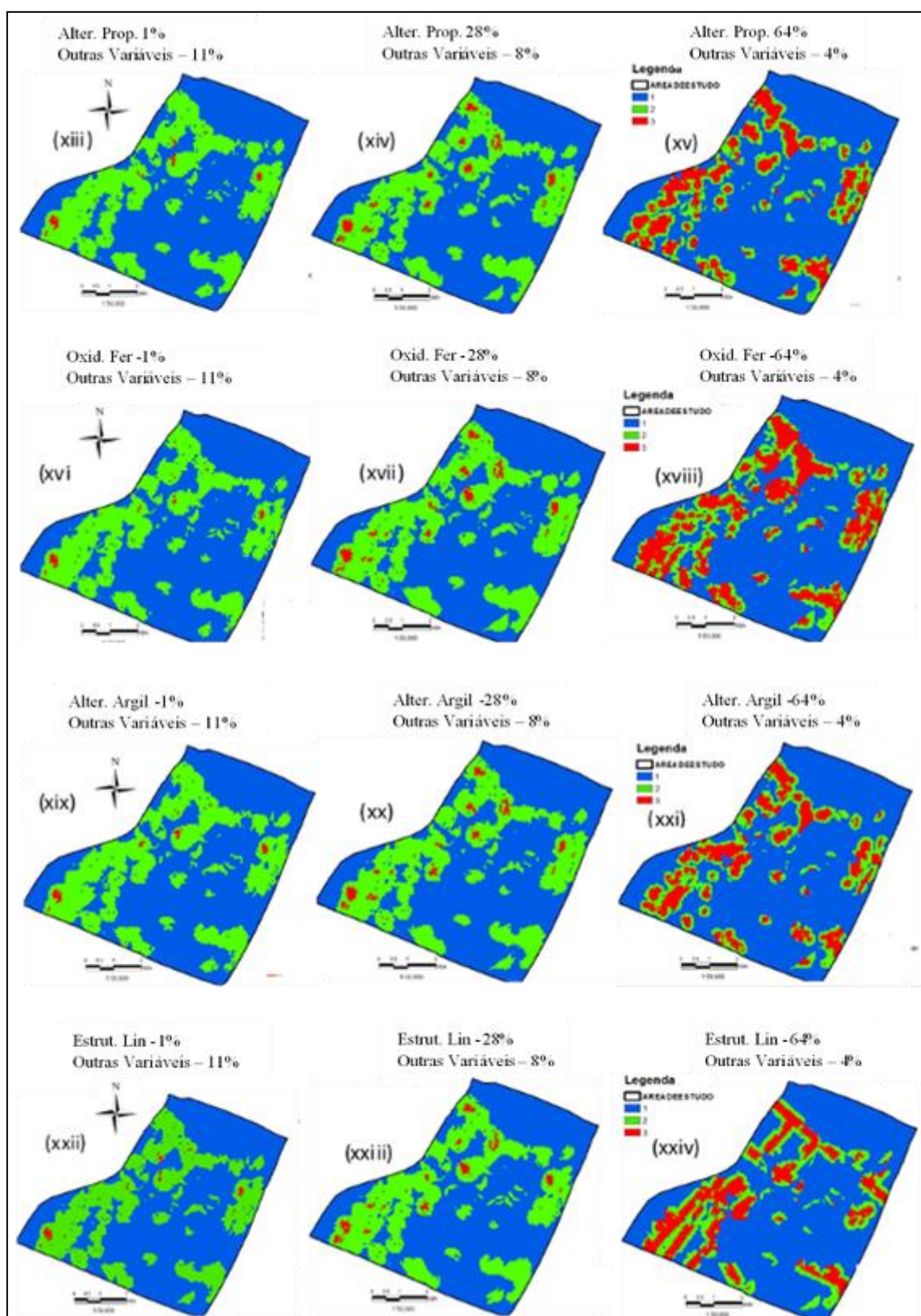
	Especialista 3		Especialista 4		Final	
Variavel	Distancia de Influencia	Pontos	Distancia de Influencia	Pontos	Zona de Influencia	Pontos
Alteração Propilitica	0 - 500	9	0 - 100	9	0 - 100m	9
	500 - 1000	6	100 - 300	7	100-200m	7
	1000 -1500	3	200 - 300	4	200-300m	3
Óxidos de Ferro	0 - 500	9	0 - 100	9	0 - 100m	9
	500 - 1000	6	100 - 300	7	100-200m	7
	1000 -1500	3	200 - 300	4	200-300m	3
Alteração Argilica	0 - 500	9	0 - 100	9	0 - 100m	9
	500 - 1000	6	100 - 300	7	100-200m	7
	1000 -1500	3	200 - 300	4	200-300m	3
Estruturas Lineares	0 - 150	9	0 - 100	9	0 - 150m	9
	150 - 300	5	100 - 300	4	150-300m	6
	300 - 450	1	200 - 300	1	300-450m	1

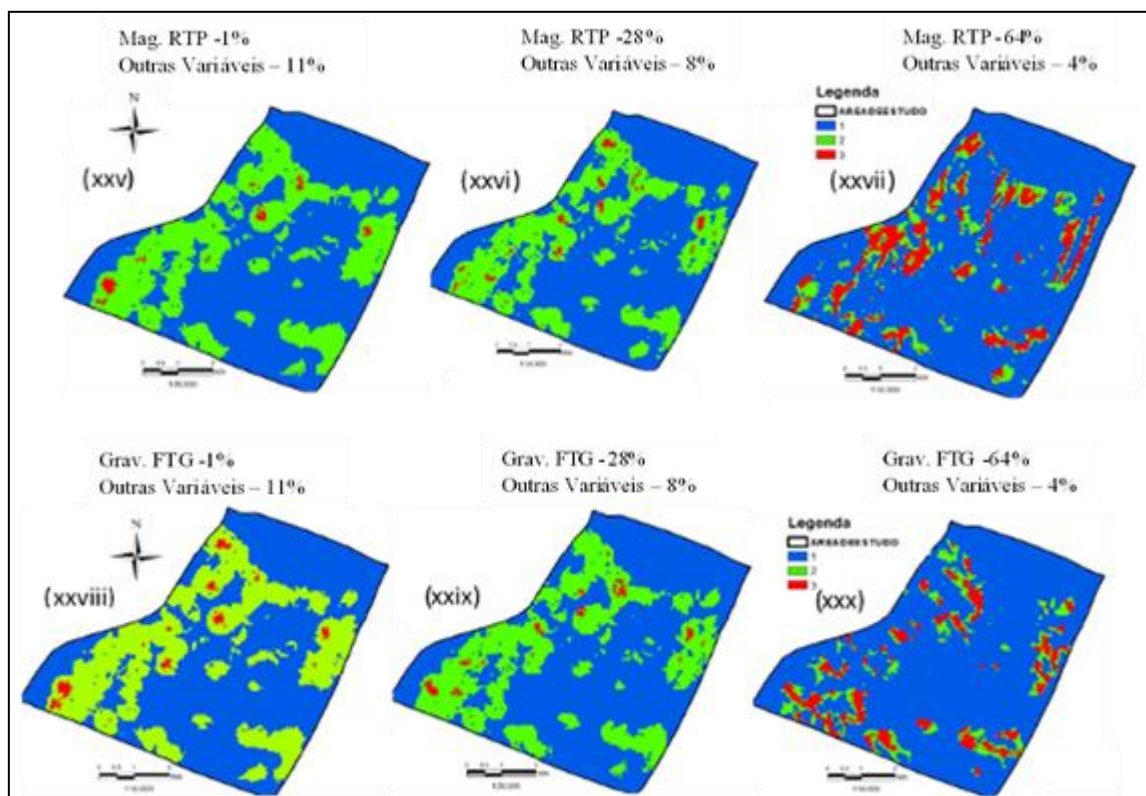
ANEXO D: PONTUAÇÃO GERAL DAS VARIÁVEIS E ATRIBUTOS

Variável	Classes	Especialista 1		Especialista 2		Especialista 3		Especialista 4		Final	
		Pontos	Influência %	Pontos	Influência %	Pontos	Influência %	Pontos	Influência %	Pontos	Influência %
Geoquímica Cu (ppm)	00.00-53.84	3	26	5	16	4	20	4	36	4	25
	53.85- 75.00	5		7		4		5		5	
	75.00-171.22	7		8		7		8		8	
	171.23-228.30	7		8		7		8		8	
	228.31-285.37	8		8		7		8		8	
	285.38-342.45	8		9		8		9		9	
	342.46-399.52	9		9		9		9		9	
VTEM (BGR)	0.00 - 141	2	15	1	30	1	20	2	15	1	20
	141 - 198	4		5		5		4		5	
	198 - 255	8		8		9		9		9	
Litologia	Quartzo Feldspático (recristalizado)	8	7	7	15	8	15	6	4	7	10
	Quartzo Feldspático Micáceo com/ sem pirite	9		9		9		9		9	
	Piroxenito	4		1		3		1		2	
	Granulito Máfico	3		2		5		4		4	
	Granulito Intermédio	3		4		3		6		4	
	Gabbro	1		3		4		2		2	
	BMF	1		2		2		2		2	
	Xisto Grafítico	2		1		1		1		1	
Geoquímica Zn (ppm)	1.08-45.32	3	9	3	8	2	9	2	12	3	10
	45.33-82.75	5		4		4		3		4	
	82.76-137.19	6		5		5		4		5	
	137.20-218.86	7		7		7		5		7	
	218.87-341.36	8		8		8		6		8	
	341.37-538.72	9		9		8		7		8	
	538.73-868.79	9		9		9		8		9	
Alteração Propilitica (dist. Infl. em 'm')	0 - 100m	9	10	9	7	9	8	9	7	9	8
	100-200m	7		6		7		6		7	
	200-300m	3		3		4		3		3	
Óxidos de Ferro (dist. Infl. em 'm')	0 - 100m	9	9	9	7	9	8	9	7	9	8
	100-200m	6		7		6		7		7	
	200-300m	3		4		3		4		3	
Alteração Argilica (dist. Infl. em 'm')	0 - 100m	9	7	8	5	9	5	8	4	9	5
	100-200m	7		6		7		6		7	
	200-300m	4		3		3		2		3	
Estruturas Lineares (dist. Infl. em 'm')	0 - 150m	9	5	8	3	9	5	8	8	9	5
	150-300m	6		5		6		5		6	
	300-450m	2		1		1		1		1	
Grav. FTG (BGR)	0.00 - 141	2	4	1	5	1	7	1	5	1	5
	141 - 198	4		6		5		4		5	
	198 - 255	8		8		9		9		9	
Mag RTP (BGR)	0.00 - 141	1	8	1	4	1	3	2	2	1	4
	141 - 198	6		5		5		3		5	
	198 - 255	9		9		8		9		9	
Total			100		100		100		100		100

ANEXO E: MAPAS DE FAVORABILIDADE COM VARIAÇÃO DA PONDERAÇÃO DE VARIÁVEIS PARA TESTE DA SENSIBILIDADE (1%, 28% E 64%).







C& SIG

UNIGIS PT

